UNIVERSITE YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

Faculté des **S**ciences et de la **T**echnologie

Département de **G**énie **de la Matière**



MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Génie Civil

Option : Ingénierie des matériaux et géotechnique.

THÈME

EFFET COUPLÉ DE LA TEMPÉRATURE ET DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES ET LA DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Par
M^{me} BACHENE SARA

Devant le jury composé de :

M.BENTCHIKOU	MCA à l'université Y.F de Médéa	Président
F.DEBIEB	MCA à l'université Y.F de Médéa	Examinateur
K.EZZIANE	Professeur à l'université H.B de Chlef	Examinateur
O.BOUKENDAKDJI	MCA à l'université Y.F de Médéa	Rapporteur
DJ.BOUKHELKHAL	MAB à l'université. Y.F. de Médéa	Invitée

Décembre 2015

REMERCIEMENTS

Qu'il me soit permis par cette occasion de remercier sincèrement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Ainsi que tous ceux qui se sont intéressés à cette recherche et qui m'ont aidé à sa réalisation et en particulier :

Je tiens à remercier en premier lieu Dieux le miséricordieux qui nous a donné de la chance du courage et de la volonté avec lesquels ce mémoire a été achevé.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Dr BOUKENDAKDJI Otmane, d'avoir accepté d'encadrer mon travail de recherches et de m'avoir confié ce sujet de recherche intéressant.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mon co- directeur de thèse M^{elle} BOUKALKAL Djamila qui a patiemment suivi ce travail et l'a enrichi par ses expériences.

Le présent travail s'est déroulé au Laboratoire de Recherches de Génie Civil de l'Université de Yahia FARES de Médéa, sous la direction de M^{elle} Boukalkal, Je tiens à la remercier pour ses aides efficaces, sa disponibilité, et ses conseils précieux.

Ma gratitude va à tous les enseignants qui ont participé à ma formation durant l'année théorique.

J'exprime ma plus sincère gratitude aux membres du juryD^{r}.BENTCHIKOU, D^{r}.DEBIEB, P^{r}.EZZIANE pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant de juger notre travail,

Mes vifs remerciements de tout mon cœur à ma famille et en particulier mes parents qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon affection.

En particulier Un grand merci à mon époux, Saad Eddine, et mon petit Yassine, qui n'ont pas eu l'attention qu'ils méritaient durant les années de préparation de ce mémoire. Je les remercie pour leur patience et leur soutien.

À tous ceux qui sont venu pour assister à cette soutenance pour un encouragement supplémentaire ou une reconnaissance à la recherche.

BACHENE SARA

Résumé

De part leur mise en œuvre aisée, les bétons fortement fluidifiés, tels que les bétons autoplaçants (BAP), sont de plus en plus employés ces dernières années. Cependant et en raison des enjeux économiques et de performance liés à la teneur élevée en liant dans ces bétons, des additions minérales sont souvent employées. En outre et du fait d'une forte demande de production, l'industrie de construction a souvent recours à l'utilisation d'un traitement thermique afin d'accélérer l'hydratation du béton.

L'objectif de ce travail est donc, d'étudier l'effet de substitution de 15% du poids du ciment par l'une des différentes additions minérales disponibles en abondance en Algérie, telle que le laitier, la pouzzolane et le calcaire sur les propriétés mécaniques et la durabilité d'un béton autoplaçant muris sous des températures de cure allant de 20 à 80°C.

Les résultats de cette étude, ont montré qu'il est possible de fabriquer du béton autoplaçant utilisant des additions minérales algériennes avec des propriétés acceptables à l'état frais et durcis.

L'augmentation de la température de cure engendre une amélioration dans les performances des BAP au jeune âge sans nuire fortement ses propriétés à long terme. Toutefois la température de cure de 40°C, est considérée comme optimale pour le cas des BAP. Alors, que le laitier granulé soit l'addition la plus convenable pour les BAP ayant subi une cure à des températures élevées.

Mots clefs : BAP, Additions minérales, Température de cure, Résistances mécaniques, Durabilité.

ملخص

نظرا لسهولة تموضعها، أظهرت الخرسانة المرسوسة ذاتيا تزايدا كبيرا في استعمالاتها. كما أنه غالبا ما تدخل في تركيبة هذا النوع من الخرسانة بعض الاضافات المعدنية و ذلك للحد من المخاطر الاقتصادية و التقنية المرتبطة بالنسبة العالية لكمية الاسمنت الموجودة في هذه الخرسانة.من جهة اخرى، تعتمد مصانع الخرسانة في أغلب الحالات الى استخدام المعالجة بالحرارة من أجل الرفع في انتاجيتها،

يهدف هذا العمل الى استبدال 15% من حجم الاسمنت بأحد الاضافات المعدنية الموجودة بكثرة في الجزائر مثل حجر الكلس، خبث الأفران و البزولان الطبيعي من أجل تشكيل خرسانة مرسوسة ذاتيا و معالجة في الماء تحت درجة حرارة تتراوح ما بين 20 و 80°م.

أثبتت النتائج التجريبية أنه من الممكن استعمال المضافات المعدنية الموجودة في الجزائر من أجل تشكيل خرسانة مرسوسة ذاتيا ذات خصائص عالية الجودة في كلتا الحالتين الطرية و الصلبة.

لقد لوحظ كذلك أن الرفع في درجة حرارة المعالجة، أدى الى التحسين من خصائص الخرسانة في الأيام الأولى دون التأثير سلبا على هذه الخصائص على الأمد البعيد. كما تمثل 40°م درجة حرارة المعالجة، المثلى في حالة الخرسانة المرسوسة ذاتيا من الناحية الاقتصادية و التقنية. بالإضافة الى ذلك قد أثبت خبث الأفران، أنه الاضافة المعدنية الأكثر ملاءمة لتشكيل خرسانة مرسوسة ذاتيا في حالة خضوع هذه الأخيرة للمعالجة تحت درجة حرارة عالية.

كلمات مفاتيح : الخرسانة المرسوسة ذاتيا، الاضافات المعدنية، المعالجة حراريا، الخصائص الميكانيكية، النفاذية.

Abstract

Due to their easy implementation, fluid concretes such as self-compacting concrete (SCC), are increasing used in recent years. However and because of economic and performance issues due to the high binder content, mineral additives are often used for making this type of concrete. In addition and due to a high demand of production, construction industry often resorts to the use of a heat treatment to accelerate the hydration of the concrete.

The objective of this work is to study the effect of substitution of 15% of the cement weight, by different mineral admixtures available in abundance in Algeria. Such as slag, pozzolana and limestone filler its mechanical properties and durability of self-compacting concrete cured under temperatures rang of 20 to 80° C.

The results of this study showed that it is possible to manufacture self-compacting concrete with acceptable properties in fresh and hardened states by using Algerian mineral admixtures.

Increasing the curing temperature causes an improvement in performance at an early age of SCC without penalizing its long-term properties. Besides the temperature of 40° C is considered being the optimal curing temperature to make economical and high performance self-compacting concrete. On the other hand, granulated slag is the most suitable mineral admixture for SCC under elevated curing temperature.

Key words: SCC, Mineral admixtures, Curing temperature, Mechanical properties, Durability.

Table des matières

Résumé

Remerciements

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et des abréviations

Introduction générale 01

CHAPITRE 1 :ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Concept et formulation des BAP……... 03

I.1.1 Particularités de la composition des bétons autoplaçant ……... 03

I.1.1.1Les granulats…… 03

I.1.1.2 La poudre…….**.....** 06

I.1.1.3 L'eau de gâchage…….**.....** 08

I.1.1.4 Les adjuvants……... 09

I .1.2 Caractérisation à l'état frais…….**.....** 14

I .1.2.1. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des bétons autoplaçant…….. 14

I .1. 2.2. Capacités de passage ……... 17

I .1. 2.3. Stabilité……. 19

I .1. 2.4. Bilan…… 20

I.1.3 Caractéristiques mécaniques à l'état durci…….**.....** 21

I.1.3.1 Résistances mécaniques……... 21

I.1.3.2Module d'élasticité…….**.....** 23

I.1.3.3Vitesse de propagation d'ondes ……... 24

I.1.4 Caractéristiques physico-chimique et durabilité…….**....** 24

I.1.4.1Absorption d'eau…… 26

I.1.4.2Perméabilité à l'eau…….. 27

I.1.4.3Perméabilité au gaz…… 28

I.1.4.4Perméabilité aux ions Chlore…….…….. 28

I.1.4.5Gel-Dégel des BAP…….……. 30

I.1.5Methode de formulation deBAP…….. 31

I.1.5.1. Méthode Japonaise…… 31

I.1.5.2. Méthode Française (LCPC)…….…. 32

I.1.5.3. Méthode Suédoise (CBI)…….…….. 33

I.1.5.4. Méthode JSCE…….…….. 33

I.2 Effets des additions sur les caractéristiques des BAP……... 34

I.2.1 Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires……..…..…… 34

I.2.2 Action des additions minérales sur les propriétés des bétons autoplaçant…...….. 37

I.2.2.1 Fillers calcaires ……... 38

I.2.2.2 Laitier de haut fourneau…….. 41

I.2.2.3 Pouzzolanes naturelles……. 43

I.3Effet de la température de cure sur les caractéristiques des bétons autoplaçants….. 46

I.3.1Effet de la température sur les caractéristiques mécaniques……..…… 46

I.3.1.1Résistance mécanique……..… 46

I.3.1.2 Module d'Elasticité……... 51

I.3.1.3Vitesse de propagation des ondes……..…. 51

I.3.2Effet de la température de cure sur la durabilité……..…….. 52

I.3.2.1 Porosité et absorption…….…… 52

I.3.2.2 Effet de la température sur le transport d'eau…….…… 54

I.3.2.3 Perméabilité aux ions chlores…….…..…… 55

I.4Conclusion…….. 57

CHAPITRE II : CARACTÉRISATIONS DES MAÉRIAUX ET METHODES D'ESSAIS

II.1. Introduction…… 59

II.2. Caractérisation des matériaux utilisés…….. 59

II.2.1. Le ciment…….…… 59

II.2.2. Les additions minérales…….…….. 60

II.2.2.1.Le laitier……. 60

II.2.2.2.La pouzzolane…… 61

II.2.2.3.Le calcaire…….. 62

II.2.3. Les granulats……..…….. 62

II.2.3.1.Sable……..……. 62

II.2.3.2.Gravier…….…….. 63

II.2.4. L'eau de gâchage …….……... 64

II.2.5. Adjuvant…….……. 64

II.3. Formulation…… 65

II.3.1. Formulation du Mortier autoplaçant…… 65

II.3.1.1. Rapport Sable / Mortier (S/M)……...……... 65

II.3.1.2. Ajustement des rapports Eau / liant et Superplastifiant / Liant……..……. 66

II.3.2. Formulation du BAP de référence…….…….. 67

II.3.3. Remplacement du ciment par l'addition minérale…….…….. 67

II.3.4. Procédure de malaxage…….……... 68

II.3.4.1. Cas de mortier……...…… 68

II.3.4.2. Cas de béton……...…... 69

II.3.5 Confection et conservation des éprouvettes ……...…….. 70

II.4. Protocole expérimental……... 72

II.4.1. Essais de caractérisation de la pâte ……. 72

II.4.1.1. Essai d'étalement au mini-cône……

II.4.1.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir en V ……..….. 72

II.4.2. Essais effectués sur Béton frais……... 73

II.4.2.1. Essai d'étalement……..…… 73

II.4.2.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir en V……..…….. 75

II.4.2.3. Essai à la boite en L…….…… 76

II.4.2.4. Essai de ségrégation dynamique au tamis…….…….. 77

II.4.2.5. Les masses volumiques…….…….. 78

II.4.2.6. Bilan……..…….. 78

II.4.3. Essais relatifs au BAP à l'état durci…… 79

II.4.3.1.Essai de compression……..…….. 79

II.4.3.2.Essai de traction par flexion……...……... 80

II.4.3.3.Vitesse de propagation des ondes ultrasonique……...…….. 81

II.4.3.4.Module d'élasticité instantané……..……. 82

II.4.4.Méthodes de caractérisations physique et la durabilité des BAP…….…… 82

II.4.4.1.Essai de porosité accessible à l'eau des bétons……...……... 82

II.4.4.2.Absorption d'eau par capillarité……... 83

II.5Conclusion …….…….. 85

CHAPITREIII : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

III.1Introduction…….…. 86

III.2Formulation du béton autoplaçant…….…... 86

III.2.1Optimisation des rapports eau sur liant et superplastifiant sur liant…….…… 86

III.2.2Détermination des compositions des différents bétons autoplaçant……..…… 88

III.3Vérifications des bétons autoplaçants a l'état frais…….. 89

III.3.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams……... 89

III.3.2Mésure du temps T50 au cône d'Abrams……..… 90

III.3.3 Mesure du Temps d'écoulement par l'essai d'Entonnoir en V……..…… 90

III.3.4 Mesure du Rapport H2/H1 de l'essai de la Boîte en L (L-Box)……. 91

III.3.5 Essai de résistance à la ségrégation par tamisage……... 92

III.3.6 La perte d'ouvrabilité…….…. 92

III.3.7 Bilan…….…… 93

III.4 Effet des additions et de la température sur les caractéristiques mécanique…….... 94

III.4.1Résistance à la compression……..... 94

III.4.2Résistance à la traction……..…… 100

III.4.3Module d'élasticité……..…….. 104

III.4.4Vitesse ultrasonique……..…… 106

III.4.5Bilan……..… 111

III.5 Effet des additions et de la température de cure sur la durabilité……..….. 112

III.5.1 porosité accessible à l'eau……...…….…. 112

III.5.2 Absorption d'eau par capillarité……..……. 115

III.5.3Bilan……..…… 120

III.6 Concluions …… 120

Conclusion générale et recommandations…… 121

Références bibliographiques……. 124

Annexe A : Exemple de calcul de la composition du mortier …….. 146

Annexe B : Exemple de calcul de la composition du béton…….. 148

Liste des figures

FigureI.1. Action des superplastifiants- Défloculation des grains de ciment …….. 09

Figure I.2. Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité 10

d'un béton …….

Figure I.3. Influence des agents de viscosité et des superplastifiants sur l'ouvrabilité 13

des BAP……. 15

Figure I.4. Exemple de comportements rhéologiques pour différent type de béton….. 18

Figure I.5. représentation en plan d'un blocage de granulat à travers deux armatures. 28

Figure I.6. Perméabilité à l'état sec d'un béton autoplaçant et un béton vibrée…… 30

Figure I.7. Perte de masse de deux BAP et un béton vibré pendent un test d'écaillage

Figure I.8. Cône et entonnoir pour mesurer l'étalement et le temps 31

d'écoulement des mortiers …… 38

Figure I.9. illustration de l'effet fillers……..

Figure I.10. Effet de la pouzzolane sur l'expansion des mortiers immergés dans une 46

solution à 1% de sulfate de magnésium…….

Figure I.11. Effet de la température de cure humide sur la résistance à la 48

compression……

Figure I.12. résistances de compression des bétons avec et sans laitier à différentes 49

conditions de cure……..

Figure I.13. Effet de température initiale sur l'évolution du module d'élasticité 53

dynamique du béton……... 55

Figure I.14. Evolution de la porosité d'un béton sous l'effet de la température……

FigureI.15. Evolution du coefficient de diffusion apparent relatif à l'état sec de trois 57

pâtes de ciment en fonction de la température……... 59

Figure II.1.Broyeur à boulets……. 59

Figure II.2. Broyeur à disque……. 61

Figure II.3. Poudre de Laitier avant broyage(a) et après broyage(b)……. 62

Figure II.4. Poudre de Pouzzolane……. 62

Figure II.5. Poudre de Calcaire…….. 64

Figure.II.6. Courbe granulométrique des granulats utilisés……... 69

Figure II.7.Séquence de malaxage du mortier ……. 69

Figure II.8. Séquence de malaxage du béton autoplaçant …… 70

Figure II.9. Malaxeur pour béton……... 72

Figure II.10. Essai d'Etalement pour Mortier…… 73

Figure II.11. Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier…….. 74

Figure II.12.Mesure du diamètre d'étalement…… 75

Figure II.13.Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)……. 77

Figure II.14.Essai de la boite en L……. 77

Figure II.15. Essai de stabilité dynamique au tamis……... 79

Figure II.16. Dispositif pour l'Essai de compression……. 80

Figure II.17. Dispositif de l'essai de la résistance à la traction par flexion trois point.. 81

Figure II.18. Dispositif pour mesure de la vitesse ultrasonique sue béton…… 82

Figure II.19. Dispositif pour mesure du module d'élasticité du béton……. 83

Figure II.20. schéma de pesée hydrostatique …… 84

Figure II.21. Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité…. 89

Figure III.1. l'étalement en fonction du type d'addition…….. 90

Figure III.2. temps T50 au cône d'Abrams en fonction du type d'addition ……..

Figure III.3. temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du type 91

d'addition…….....

Figure III.4. Rapport H2/H1 de l'essai de la Boîte en L (L-Box) en fonction du type 91

d'addition……. 92

Figure III.5. Indice de ségrégation en fonction du type d'addition……. 92

Figure III.6. La perte d'ouvrabilité des différents BAP en fonction du temp…….

FigureIII.7. Résistance à la compression en fonction d'âge des différent BAP pour 95

chaque température de cure…….

FigureIII.8. Résistance à la compression en fonction d'âge de chaque BAP conservé à 97

différentes températures…….....

Figure III.9. Résistance à la traction en fonction d'âge des différents BAP pour 100

chaque température de cure…….

Figure III.10. Résistance à la traction en fonction d'âge de chaque BAP conservés à 102

différentes températures…….. 104

Figure III.11. Module d'élasticité à 28jours en fonction de la température de cure….. 105

FigureIII.12. Module d'élasticité à 28jours en fonction de type d'addition……..

Figure III.13. relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression à 106

28 jours……

Figure III.14. Corrélation entre les résistances à la compression et les vitesses de 110

propagation des ondes pour chaque température……..... 112

Figure III.15. Porosité accessible à l'eau à 28 jours en fonction du type d'addition….. 113

Figure III.16. Porosité accessible à l'eau à 28 jours en fonction du type d'addition…..

Figure III.17. Relation entre la porosité ouverte et la résistance en compression de 115

tous les BAP mesurées à 28 jours……... 116

Figure III.18. Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours des différents BAP

à chaque température de cure…….. 117

Figure III.19. Sorptivité à l'âge de 28 jours en fonction des températures de cure……

Figure III.20. Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours de chaque BAP à 118

différentes températures de cure…….. 119

Figure III.21. Sorptivité à l'âge de 28 jours en fonction de type de BAP……..

Liste des tableaux

Tableau 1.1. les propriétés et les essais essentiels des BAP à l'état frais…….. 20

Tableau 1.2. Absorption d'eau par immersion et par capillarité de sept BAP et un béton vibré Boel…… 27

Tableau I.3. Résultats d'un essai d'écaillage (résistance au gel-dégel) d'un BAP et un béton vibré…… 31

Tableau I.4. Effet de la température sur la porosité totale et les dimensions des pores dans un ciment contenant 15% de cendre volante……. 53

Tableau I.5. Coefficient de diffusion apparent des pates…….. 56

Tableau II.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CPA CEM I .. 60

Tableau II.2. Caractéristiques physico-mécanique du ciment CPA CEM I 42.5…….. 60

Tableau II.3. Caractéristiques chimiques du laitier d'El Hadjar……..…… 61

Tableau II.4. Caractéristiques chimiques de la pouzzolane de Béni-Saf…….. 61

Tableau II.5. Caractéristiques chimiques des fillers calcaires ……. 62

Tableau II.6. Propriétés physiques d'identification des sables utilisés……. 63

Tableau II.7. Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés…… 63

Tableau II.8. caractéristiques du superplastifiant…….. 64

Tableau II.9. Résultats des résistances à la compression à 28 et 90 jours pour un mortier à la pouzzolane subissant une cure à température variable…….. 71

Tableau II.10. Caractérisation des bétons autoplaçants a l'état frais…… 79

Tableau III.1. Composition et Résultats des essais sur mortiers pour différentes valeurs d'E/L et SP/L…… 87

Tableau III.2. Compositions des mélanges…… 88

Tableau III.3. Vitesse ultrasonique des différents bétons en fonction de l'âge (m/s).. 107

Tableau III.4. Caractéristiques relatives à l'absorption capillaire des BAP à 28 jours. 115

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES NOTATIONS

ADV	Agent de viscosité
Al_2O_3	Oxyde d'aluminium
BAP	Béton autoplaçant
BAPC	Béton autoplaçant à base de calcaire
BAPL	Béton autoplaçant à base de laitier des hauts fourneaux
BAPP	Béton autoplaçant à base de la pouzzolane naturelle
BAPT	Béton autoplaçant sans addition
BHP	Béton de haute performance
BO	Béton ordinaire
BV	Béton vibré
C2S	Silicate bibasique
C3A	Aluminate tricalcique
C3S	Silicate tricalcique
C4AF	Alumino-Ferrite- Tétracalcique.
$Ca(OH)_2$	Hydroxyde de calcium ou portlandite.
CaO	Carbonate de Calcium ou Calcaire
cm	Centimètre
CO_2	Dioxyde de calcium
CPA	Ciment portland artificiel
CSH	Hydroxyde de calcium
$D_{étal}$	Diamètre d'étalement
D_{max}	Diamètre maximal
E_{ij}	Module de déformation longitudinale instantanée
E/C	Eau sur ciment
E/P	Eau sur poudre
f_{ck}	Résistance à la compression
Fe_2O_3	Oxyde ferrique
fs	Résistance à la traction
g	Gramme
g/l	Gramme par litre
G/S	Gravier sur sable
H	Hauteur
HR	Humidité relative
j	Jours

K_2O	Oxyde de potatium
Kg/m^3	Kilogramme par mètre cube
LS	Les lignosulfonates modifiés
m/s	Mètre par second
m^2/s	Mètre carré par second
MAP	Mortier autoplaçant.
MgO	Oxyde de magnésium
ml/cm^2	Millilitre par centimètre carré
mm	Millimètre
MPa	Méga pascal.
M_{VR}	Masse volumique relative
Na_2O	Oxyde de sodium
Pa	Pascal
$Pa.s^{-1}$	Pascal par second
PC	Polyacrylate
PMS	Le polymère de mélamine sulfonate
PNS	Le polymère de naphtalène sulfonate
PZN	Pouzzolane naturelle
Rm	La vitesse relative d'écoulement
s	Second
SCC	Self compacting concrète (béton autoplaçant)
SiO_2	Dioxyde de silicium
SO_3	Trioxyde de soufre
SP	Superplastifiant
SSB	Surface spécifique de Blaine
T	Température
t	Temps
V_i	La proportion volumique des granulats de taille di
VPO	Vitesse de propagation des ondes ultrasonique
γ	La vitesse de déformation
Γm	L'étalement relatif
η_p	La viscosité plastique
µm	Micromètre
τ	Taux de cisaillement
τ_0	Seuil de cisaillement initial

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les bétons autoplaçants constituent une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures. Depuis son apparition, l'utilisation de ce type de béton n'a cessé de se généraliser, et ce grâce à ses avantages multiples tant au niveau technologique, économique qu'environnemental.

Le BAP se caractérise par une formulation différente du béton ordinaire qui lui confie une grande fluidité, déformabilité et stabilité tout en développant une bonne compacité. Ces caractéristiques permettent une mise en place facile et rapide sous l'action de la gravité, sans besoin de vibration externe et c'est une amélioration très importante dans les conditions de travail sur chantier qui minimise les nuisances sonores, réduit la pénibilité du travail et les délais de réalisation des ouvrages. Plus l'excellente qualité des parements et l'enrobage parfait des aciers, les caractéristiques mécaniques et la durabilité sont garantis

L'inconvénient majeur du béton autoplaçant est l'utilisation d'une teneur en ciment élevée (450 à 600 kg/m3) donc une augmentation du cout par rapport à un béton ordinaire. Le problème ici réside dans le fait que la production du ciment nécessite une grande énergie et libère en même temps une grande quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ce qui a pour effet d'une part d'augmenter les dépenses de production du ciment, et d'autre part d'affecter négativement l'environnement et par conséquent la santé de l'homme en polluant l'air.

Pour éviter les mauvaises conséquences liées à l'utilisation du ciment seul comme liant dans les BAP, une solution judicieuse consiste à utiliser des additions minérales telles que la pouzzolane naturelle, la poudre de calcaire et le laitier des hauts fourneaux.L'emploi de ces matériaux comme addition au BAP pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante, en exploitant des matériaux locaux qui se trouvent en abondances avec quantités importantes et permettant aussi la valorisation des sous-produits industriels.

Par ailleurs, les bétons peuvent être exposés à des températures élevées soit dans les conditions climatiques extrêmes ou comme un procédé de cure dans la préfabrication. La connaissance des effets de la température élevée sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants est nécessaire pour valoriser ou limiter son utilisation, ainsi que le choix de l'addition adéquat dans ses conditions.

L'objectif essentiel de cette recherche est de vulgariser la technique de béton autoplaçant en exploitant des matériaux locaux, précisément le laitier des haut fourneau, le calcaire et la pouzzolane naturelle dans les conditions normales et avec un traitement thermique sous une plage de température varie entre 20 et 80°C .

Le travail est présenté en trois chapitres :

Le premier chapitre qui servira par la suite de base pour les analyses et les discutions des résultats expérimentaux, est consacré à l'étude bibliographique regroupant trois parties : dans la première partie, nous présentons le concept et la formulation des bétons autoplaçants, ainsi que l'influence des principaux constituants sur les propriétés des BAP. Dans la deuxième partie nous avons abordé les effets des additions sur les caractéristiques des BAP. Enfin, dans la troisième partie nous présentons les effets de la température de cure sur les caractéristiques des BAP.

Le deuxième chapitre est destiné en premier lieu à la caractérisation des matériaux entrant dans la composition du BAP, en second lieu à la confection et la conservation des éprouvettes passant par la formulation et le malaxage et finalement dans le protocole expérimental une description détaillé des essais de caractérisation du mortier à l'état frais, et du béton à l'état frais et durci.

Le troisième chapitre est consacré à l'exposition et la discussion des différents résultats obtenus ; Après une fixation de la formulation des BAP avec et sans additions, une vérification des caractéristiques à l'état frais est achevée puis on passe à la discussion des effets des additions et de la température de cure sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état durci.

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur notre travail ainsi que d'éventuelles perspectives et recommandations.

CHAPITRE 1

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Concept et formulation des BAP

Les bétons autoplaçant (BAP) sont des bétons très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique). Ce béton possède un risque plus élève de ressuage et de ségrégation où il faut, lors de la formulation, améliorer la déformabilité sans nuire à la stabilité qui sont deux critère opposées.

Ce principe du BAP est assuré grâce à des caractéristiques rhéologiques exceptionnelles (un seuil de cisaillement faible pour que l'écoulement s'amorce rapidement combinant une viscosité modérées pour limiter le temps d'écoulement). Le résultat est un matériau déformable, très homogène, cohésif et stable.

I.1.1 Particularités de la composition des bétons autoplaçant

Formuler un BAP, c'est trouver un arrangement des divers constituant répondant à un cahier des charges donnée. Ce cahier des charges concerne les caractéristiques à l'état frais (la capacité au remplissage, la capacité de passage, la résistance à la ségrégation, la stabilité, rhéologie), la résistance du BAP à 28jours et la durabilité. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandé, comme par exemple, une prise accéléré ou retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale.

I.1.1.1 Granulat

Les gros granulats sont un facteur très important pour la formulation des BAP. La quantité, la granulométrie, la forme et la porosité sont à considérer lors de la formulation d'un BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l' origine du blocage du béton au milieu confiné, il faut en limité le volume des gros granulats ainsi que son diamètre maximale. D'un autre coté le dosage en gravillons doit être suffisant pour contribuer à la compacité du squelette granulaire.

Khayat et al. **[1]** ont montrés que les gros granulats présente la cause principale du blocage, également, il a été constaté qu'à partir d'un certain volume des gravillons, l'énergie gravitationnelle nécessaire pour l'écoulement du béton est consommée par les contraintes se développant par des frictions inter granulaire. Selon les résultats obtenus, la fluidité des BAP

a été améliorée en utilisant une combinaison de 70% de gros granulat d'un diamètre maximal de 14mm et de 30% d'un diamètre de 20mm. En effet ils ont constaté que la capacité de remplissage diminue avec l'augmentation de la teneur en gros granulats **[2].**

Dans son mémoire Abib **[3]** a étudié l'effet de la variation de dimension du gravier sur l'ouvrabilité et la résistance des BAP. Il a conclu que le diamètre d'étalement d'un BAP augmente lorsqu'on diminue le volume de gravier de la fraction 8/16. El-Ariss **[4]** trouve que la quantité des gros granulats peut être réduite sans grande influence pour la résistance à la compression dans la limite de 0,3 à 0,4 du rapport Gros granulats sur la quantité totale des granulats. Des considérations sur la capacité de passage entre les armatures de la structure considérée **[5-7]** qui fixent le volume critique de granulats associe.

Il apparaît aussi que le risque de blocage, pour un ferraillage donné, augmente lorsque le diamètre maximum des granulats augmente **[8]**. Dans sa thèse Bethmont **[9]** explicite que la taille maximale D_{max} des granulats, étant un facteur non négligeable, peut provoquer un blocage. Domone et al. **[10, 11]**ont fait une synthèse des principales compositions utilisées pour 51 applications dans les 11 dernière années, ils en ressortent que le diamètre maximal des granulats utilisé n'excède guère 20mm.

La forme des granulats à une influence sur la rhéologie des BAP. Les coefficients de frottements sont plus faibles entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés, En effet, les granulats roulés permettent de diminuer le risque de ségrégation. Selon Domone **[12]** la différence de résistance entre les mélanges contenant du gravier concassé et du gravier roulé est plus faible pour les BAP que pour les bétons ordinaires mais il est toujours possible d'utiliser des granulats concassés pour la formulation des BAP.

Selon Yurugi et al. rapporté par Bensebti **[13]**, le volume des gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage où il a lié la diminution de la capacité de remplissage par l'augmentation de la teneur en gros granulat.

Okamura et al. **[14]** mentionnent que le premier point dont il faut tenir compte lors de la formulation d'un BAP est de limiter la teneur en gros granulats car les bétons frais à faibles dosages en granulats se caractérisent généralement par une haute résistance à la ségrégation.

Des sables possédant un module de finesse variant entre 2,4 et 2,6 ont été utilisés avec succès dans la production des BAP **[12]**. Cependant, un sable fin est recommandé pour assurer une résistance satisfaisante à la ségrégation **[15]**.

- Sable/Mortier

Khayat et al. **[16]** ont déterminé les quantités optimales en sable capables d'améliorer la fluidité des mélanges de béton en présence d'un agent colloïdal et de superplastifiant. Cette quantité de sable, elle correspondait à un rapport Sable/Pâte (volumique) de 0,6.

Selon OKAMURA [14] le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier par contre BOUKENSAKDJI **[17]** a constaté que le mortier avec un rapport S/M de 0.50 a donné une meilleure fluidité par rapport aux autres mortiers.

Edamatsu et al. **[18]** ont réussi grâce à l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) à augmenter le dosage de sable dans le mortier à plus que 40% et à réduire donc le volume de pâte, et particulièrement du ciment, dans le béton.

La diminution du rapport Sable/Mortier mène à une réduction du volume de sable, et par conséquent l'augmentation du volume de la pâte de ciment, ce qui contribue significativement à l'amélioration de la fluidité. Westerholm et al. **[19]** affirment que la large quantité de sable fin dans le mélange de mortier influe sur la rhéologie de ce dernier, elle augmente le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique. Fang et al. **[20]** ont trouvé que, pour la fabrication d'un béton autoplaçant à haute performance, il est préférable de prendre le rapport Sable/Mortier entre 45 et 48%.

- Gravier/Sable

Le rapport G/S est lie à la compacité du squelette granulaire. Pour les BAP, un rapport G/S proche de 1 permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire et de réduire par conséquent la quantité de la pâte liante nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitée **[22]**, Spengler et al. **[21]** ont pu obtenir un bon BAP quatre fois plus riche en sable qu'en gravier (sable 80% et gravier 20%) avec un rapport E/C égale à 0,5 ; mais cela peut nuire à la résistance par la suite.

I.1.1.2 La poudre

La poudre est la composante clé du BAP. En plus de sa fonction principale de relier les différents constituants du béton en présence de l'eau, la poudre occupe les vides intergranulaires en rendant le matériau plus dense. L'augmentation de son volume a pour but d'améliorer les propriétés du béton aussi bien à l'état frais (déformabilité, capacité de passage et résistance à la ségrégation), qu'à l'état durci (résistance et durabilité) **[23].**

La finesse de la poudre joue un rôle important dans l'amélioration des caractéristiques des BAP. L'augmentation de la finesse de la poudre contribue à l'amélioration de la déformabilité, de l'ouvrabilité, de la résistance à la ségrégation et de la compacité du béton **[24, 25]**. Ozawa et al. **[26]** ont rapporté que des BAP contenant des poudres fines (de grande finesse) présentent des grandes résistances à la ségrégation en raison de la grande quantité d'eau retenue par les grains de la poudre fine. Cependant, l'utilisation des poudres contenant beaucoup des particules fines inferieures à 20µm nécessite un dosage élevé en SP pour les disperser **[27].** Noumowe et al. **[28]** ont montré que la quantité des particules fines inferieures à 100µmà un effet significatif sur la capacité de remplissage et la résistance à la ségrégation.

En général, la poudre est composée d'un ciment Portland seul. Toutefois, pour économiser le cout de production des BAP et éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, la poudre est souvent un composé binaire voire ternaire, ciment Portland mélangé avec fumée de silice, laitier de haut fourneau, cendres volantes, filler calcaire….etc.

- Le ciment

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

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO_2) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20% **[29].**

Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de celle cuisson (clinkérisation) sont :

- Le silicate tricalcique, $3CaO.SiO_2$, que l'on écrit C_3S ;
- Le silicate bicalcique, $2CaO.SiO_2$, que l'on écrit C_2S ;
- L'aluminate tricalcique, $3CaO.Al_2O_3$, que l'on écrit C_3A ;
- L'aluminoferritetetracalcique, $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$, que l'on écrit C_4AF.

Suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, le clinker est constitué de 62% à 67 % de chaux combinée (CaO), de 19 % à 25 % de silice (SiO_2), de 2 % à 9 % d'alumine (Al_2O_3), et de 1% à 5 % d'oxyde de fer (Fe_2O_3).

Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, hémihydrates, anhydrite) et d'additifs **[30]**.

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts **[31]**.

- Les additions minérales (<80 μm)

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, substituant ou non une partie du ciment. A l'origine, les ajouts ont été lancés pour des raisons économiques, soit ils existaient sous forme de produits naturels qui ne devaient être que peu traité comme la pouzzolane et le calcaire, soit ils résultaient de processus industriels sous forme de déchets ou de sous-produits comme les fillers, la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau.

Ainsi l'incorporation de ces additions minérales comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le cout de béton et contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite l'utilisation de grande quantité de combustible.

Il y a eu en outre l'augmentation des couts énergétiques, auxquels plus tard, sont venues s'ajouter des raisons écologiques. On compte parmi ces derniers les oppositions pour la mise en exploitation de nouvelles zones d'extraction de matière premières pour la fabrication de clinker, ainsi que l'émission du CO_2 de l'industrie cimentaire dans la nature.

Indépendamment de ces avantages écologiques et économiques, les ajouts appropriés influant positivement sur certaines des propriétés du béton, à l'état frais, l'interposition des fines entre les particules solides de la suspension contribue à modifier sa structure. Ainsi, les additions minérales substituant une partie du ciment agissent généralement en baissant le seuil de cisaillement des bétons **[32]**. Toutefois, l'influence des additions minérales sur la viscosité des bétons est fonction du dosage, du type, de la finesse, de la forme des particules et de la granularité des additions **[32, 33, 34]**.

L'augmentation du dosage en fines dans un béton, pour un dosage constant en ciment, implique l'augmentation de la concentration volumique en solides et donc, favorise généralement la croissance de la viscosité du béton. Par contre, pour un dosage en poudre (ciment et addition) constant, la substitution du ciment par de l'addition peut influencer l'écoulement du béton en fonction du type de l'addition. En effet, certaines additions comme la fumée de silice ont une demande en eau importante par rapport au ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité et mécaniques du béton **[35]**, et augmenter la viscosité.

D'autres additions comme les laitiers de haut fourneaux et les cendre micronisées ont de leur côté une faible demande en eau par rapport au ciment et sont donc bénéfique pour la formulation des bétons autoplaçant et à hautes performances, puisqu'ils permettent de baisser la viscosité et d'améliorer les propriétés mécaniques des bétons **[35, 36]**.

En général, les additions minérales influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci ; elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau **[36]**. Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les additions minérales réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

I.1.1.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton. L'eau de gâchage doit être propre, elle ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes **[37]**:

- 2 g/l pour les bétons à hautes résistances
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

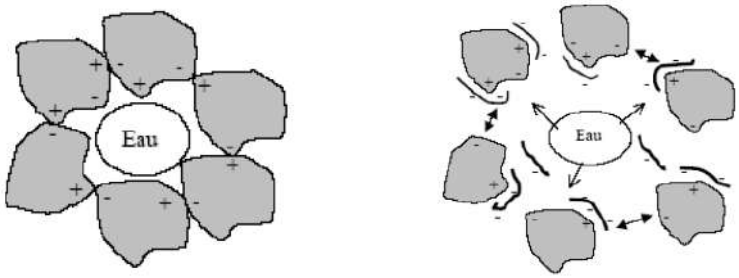
- 15 g/l pour les bétons à hautes résistances
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances

I.1.1.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des additions qui sont incorporées durant le malaxage pour améliorer les caractéristiques du béton (fluidité, plasticité, propriétés rhéologiques). Les adjuvants les plus utilisés dans les BAP sont les superplastifiants et les agents de viscosité.

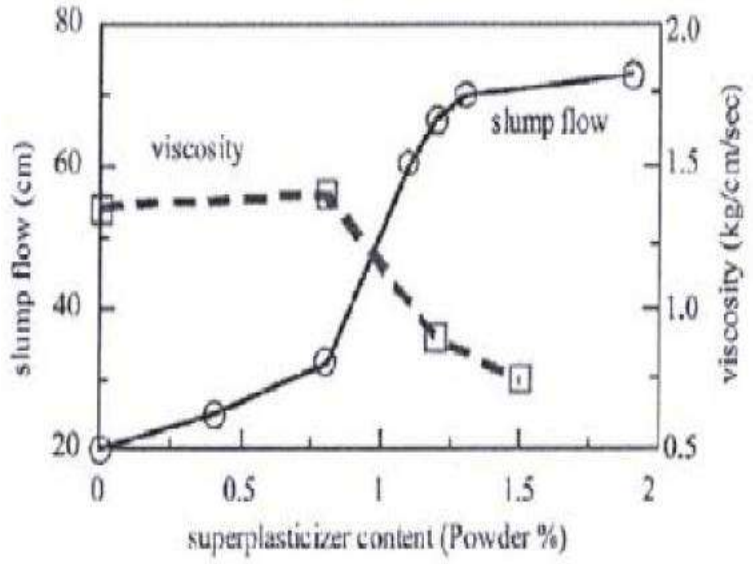
- Les superplastifiants

L'apparition des bétons autoplaçant est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants **[38]**.Les superplastifiantssont des polymères à chaines macromoléculaires très longues. Ils permettent de défloculer les grains de la poudre au contact de l'eau en agissant par combinaison d'effets de répulsion électrostatiques qui permet de neutraliser les charges électriques présentes à la surface des grains et un stériques qui engendre l'écartement des grains des autres **[39]** . Il en découle que l'eau initialement piégée se retrouve de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (figureI.1).



FigureI.1. Action des superplastifiants- Défloculation des grains de ciment **[39]**.

L'ajout des superplastifiants mène à une diminution des frottements intergranulaire. Ainsi va engendrer une diminution du seuil de cisaillement «τ_0 » ce qui traduit par une augmentation de l'étalement (figure I.2). Alors que la viscosité du mélange n'est réduite dans une moindre mesure puisque la fraction volumique des suspensions solide reste invariable.



FigureI.2. Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton **[40]**.

Les superplastifiants peuvent réagir, également, avec les hydrates du ciment [40] ; Ainsi l'action d'un superplastifiant lorsqu'il est introduit dans un mélange est décomposé comme suit : une partie adsorbée, une partie consommée par les réactions avec les hydrates et une partie en excès, reste en solution **[38]**.

Il existe plusieurs générations de superplastifiants, correspondant à différents polymères ou différentes configurations de ces polymères, qui ont été élaborées au cours des dernières années **[35]**. Les superplastifiants peuvent être regroupés de la manière suivante:

- Le polymère de mélamine sulfonate (PMS),
- Le polymère de naphtalène sulfonate (PNS),
- Les lignosulfonates modifiés (LS),
- Les superplastifiants à base de polyacrylate, polycarboxylate (PC) ou de polyéthylène.

Suivant la nature du superplastifiant utilisé, les deux effets sont combinés, avec parfois une prédominance de l'un des deux. Les résultats obtenus par Björnström et Chandra **[41]** montrent que le mécanisme, par lequel les polymères dispersent les particules de ciment, est fondamentalement différent. Les superplastifiants avec sulfate ont entraîné une charge négative sur les particules de ciment, les dispersant par la répulsion électrostatique, tandis

qu'avec le polymère poly-carboxylate, le mécanisme de dispersion est principalement contrôlé par un encombrement stérique.

Le temps optimal d'addition du superplastifiant dans le béton est 2 minutes après le mélange eau-ciment-agrégats **[12]**. A ce moment, le superplastifiant reste suffisamment disponible pour jouer son rôle de dispersant du C_3S et C_2S, et ce qui explique l'augmentation de la fluidité

Avec le développement de la technologie des bétons à haute performance et les bétons autoplaçant, il y a eu apparition de plus en plus des phénomènes d'incompatibilité ciment-superplastifiant. Ces phénomènes sont liés à une interaction entre le superplastifiant et le sulfates de calcium présent dans le ciment. En plus de leur action dispersante, les superplastifiants agissent avec l'aluminate tricalcique (C_3A), pour bloquer la formation d'ettringite et même retarder ou bloquer plus ou moins la mise en solution de la plupart des différentes formes de sulfates de calcium que l'on retrouve dans le ciment.

Ce problème d'incompatibilité se présente surtout dans les bétons à faible E/C (BHP). Dans tel cas on remarque une perte de fluidité (affaissement) rapide. Cependant, cette incompatibilité est très rarement remarquée dans les bétons avec un E/C > 0,5. En plus, Agarwal et al. **[42]**, ont trouvé que la compatibilité du superplastifiant avec le ciment dépend plus de la qualité du ciment ou du liant. Ainsi le ciment de classe 52,5 est plus compatible que les classes 32,5 et 42,5. En plus ils ont trouvé que le ciment au laitier était compatible avec tous les superplastifiants qu'ils ont utilisés.

Selon Boukendakhdji **[17]**, un des paramètres clés qui gouverne le comportement rhéologique des combinaisons ciment/polysulfonates est l'équilibre qui existe entre le nombre de sites actifs de la phase interstitielle et la quantité d'ions rapidement solubles **[43]**. S'il y a un bon équilibre entre ces deux valeurs, ou un excès d'ions, la combinaison ciment/superplastifiant sera compatible et robuste puisque finalement assez peu de polymères seront consommés par réaction de sa terminaison sulfonate avec le C_3A. Quand la concentration en ions est insuffisante, on voit alors de nombreuses molécules de polysulfonate disparaître de la solution interstitielle et se combiner avec le C_3A.

La compatibilité et la robustesse de la combinaison ciment/superplastifiant est alors fonction de la valeur de ce déficit et de son évolution dans le temps ; plus ce déficit est grand, plus la combinaison est incompatible et non robuste. Un moyen simple de remédier à ce type

d'incompatibilité et de robustesse est de rajouter une quantité adéquate de sulfates très rapidement solubles, du sulfate de sodium par exemple pour rétablir un léger excès d'ions dans la solution interstitielle.

- Les agents de viscosité (ADV) ou agent Colloïdaux

Généralement les superplastifiants, par leur rôle de fluidifiant diminuent la viscosité du béton frais ce qui le rend moins stable vis-à-vis de la ségrégation, c'est pour cela que les agents de viscosité sont utilisés.

Ces produits sont des hypocycloides extraits dans les produits naturels qui ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

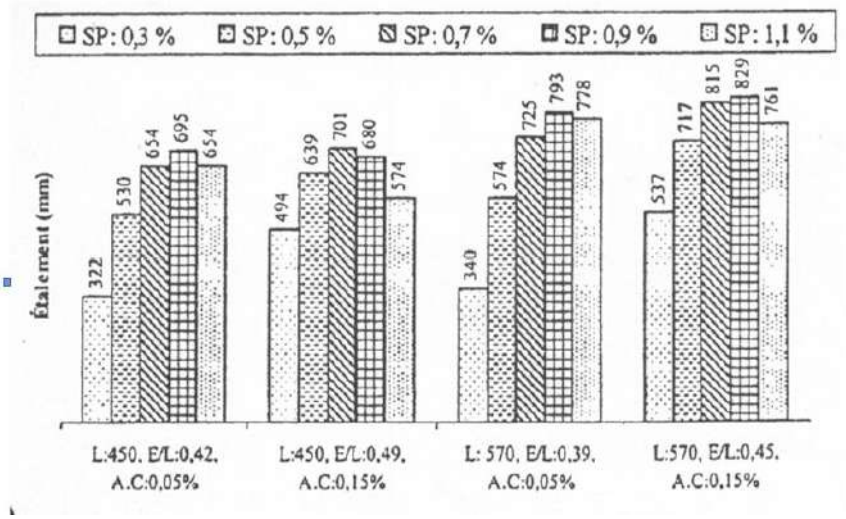
Les produits les plus utilisés pour la formulation des BAP sont :

- Les dérivés cellulosiques:"hydroxypropyl méthyle cellulose" (HPMC), "Hodroxyethyl cellulose" (HEC), "carboxymethyl cellulose" (CMC),
- Les polymères issus de la biotechnologie, qui sont des polysaccharides obtenus par fermentation (gomme de Xanthane de welan, biopolymère p3,…)

Les agents colloïdaux améliorent la viscosité et diminuent la ségrégation et le ressuage dans les bétons, par contre ils augmentent la demande en eau du mélange et nécessitent leur utilisation en présence de superplastifiants **[44]**. Les types les plus utilisés sont des dérivés de cellulose et de polysaccharides de source microbienne. Ce sont des polymères solubles dans l'eau qui forment des solutions visqueuses par adsorption des longues chaînes sur la périphérie des molécules d'eau. En outre, les molécules adjacentes des chaînes de polymères peuvent développer des forces attractives entre elles et bloquer le mouvement de l'eau en causant un gel et l'accroissement de la viscosité. Les agents colloïdaux maintiennent aussi l'uniformité du béton au cours de sa déformation en évitant l'accroissement local des contraintes dû au rapprochement des gros granulats **[45]**.

Certains auteurs, proposent d'autres agents de viscosité pour la formulation des BAP. Selon ces auteurs les polysaccharides sont difficiles à disperser dans un béton et leur dispersion dans l'eau pourrait induire une attaque bactérienne de la solution, ce qui limiterait le temps d'utilisation. Les auteurs proposent l'utilisation, combinée de silice précipitée (particules de dimension 50 µm) renfermant 20% de matière sèche et de polysaccharide dispersé dans une huile végétale.

A. Ghezal **[46]** a utilisé des BAP à 450 kg/m^3 et 570 kg/m^3 de liant avec différents dosages en superplastifiant et différents dosage en agent colloïdal, et un rapport E/L qui varie entre 0,42 et 0,45. L'auteur a remarqué que l'étalement diminue avec l'augmentation du dosage en agent de viscosité et il a constaté que quatre facteurs principaux sont capables d'entraîner un effet très significatif : le dosage en liant, le rapport E/L, le dosage en superplastifiant et le dosage en gomme de welan. Les résultats ont donné l'histogramme présenté dans la figure I.3.



FigureI.3. Influence des agents de viscosité et des superplastifiants sur l'ouvrabilité des BAP **[46]**.

Au niveau de la stabilité, les bétons contenant des superplastifiants et des agents colloïdaux présentent moins de ressuage. Selon Bensebti **[13],** Kasai a développé des bétons fluides ($D_{étal}$ = 500 à 600 mm) de rapport E/C de 0,6 et contenant 30% de remplacement massique du ciment par du laitier avec différents dosages de mélanges (A et B) de superplastifiants et d'agent colloïdal combinés (4,62% de type A et 4,62% B de la masse des liants). Ils ont enregistré un ressuage de 0,3 ml/cm^2 (essai réalisé sur un cylindre de diamètre 15 cm et de hauteur 30 cm, le moyen de mesure n'est pas déterminé). Ceci est inférieur à la spécification de la norme JASS5 (0.5 ml/cm^2).

D'autre part, MENAI **[45]** a exposé des résultats des essais sur un mortier avec différents dosages en agent colloïdal à base de glucose (dosage variant de 0 à 0,05% du volume de l'eau) et de superplastifiant (dosage variant de 1,2 à 3% de la masse de liant) qui relève que le ressuage était nul quand la teneur en agent colloïdal dépasse 0,03% (les caractéristiques du mortier n'ont pas été spécifiées).

I.1.2 Caractérisation à l'état frais.

L'intérêt majeur d'un BAP réside dans ses propriétés à l'état frais qui lui permet d'apporter une réelle innovation dans la construction actuelle. Alors il est important de pouvoir caractériser ces bétons d'un point de vue d'écoulement.

En vue d'une caractérisation complète du matériau, il est nécessaire de s'intéresser à trois comportements:

- la déformabilité,
- la capacité de passage,
- le maintien de la stabilité.

En général, il est assez difficile à rencontrer les trois caractères en même temps, pour cela de nombreux essais sont optimises pour une utilisation sur chantier et autres pour une caractérisation plus poussées dans le cadre des études en laboratoire. Ces essais sont regroupés sous la forme de recommandations en 2002 puis en 2005 par l'EFNARC **[48, 49]**, par de Schutter en 2005 **[50]** et enfin par l'AFGC dans le cadre du Projet National Béton Autoplaçant en 2008 **[51]**. Ces recommandations ont finalement conduit à l'écriture d'une norme européenne EN 206-9, Règles complémentaires pour le béton autoplaçant datant de juin 2010 **[52]**.

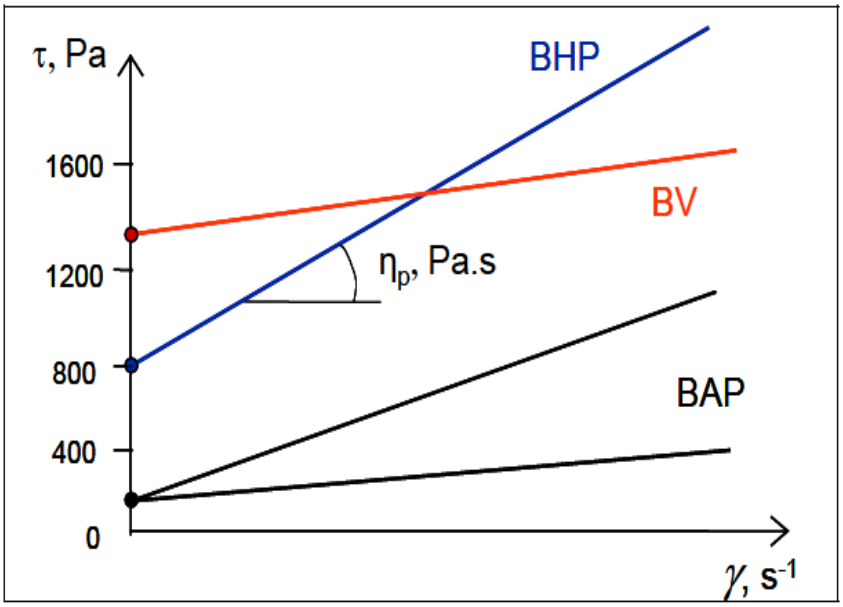
I.1.2.1. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des bétons autoplaçants

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique. La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées.

Le comportement rhéologique d'un matériau (figureI.4) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement τ_0. Le fluide est considéré comme binghamien si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation :

$\tau = \tau_0 + \eta_P \gamma$ Equation I.1

Avec τ la contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 le seuil de cisaillement (Pa), η_p la viscosité plastique (Pa.s$_{-1}$) et γ la vitesse de déformation (s$_{-1}$).



FigureI.4. Exemple des comportements rhéologiques pour différent type de béton **[53]**.

En ce qui concerne les bétons autoplaçants, des auteurs **[54]** ont montré que leur équation de comportement suit le modèle de Herschel-Bulkley dont l'équation de comportement est la suivante :

$\tau = \tau_0 + a\gamma^b$ Equation I.2

Avec a et b sont des constantes de comportement.

Toutefois, ce modèle est plus exigeant que celui de Bingham car il nécessite la détermination d'un paramètre supplémentaire.

Ces grandeurs (seuil de cisaillement, viscosité plastique) permettant de définir le comportement d'un béton lors de sa mise en place sont quantifiables à partir d'appareils appelés rhéomètres. A ce jour, les principaux dispositifs expérimentaux utilisés pour des mesures sur béton frais sont **[53]**:

- le viscosimètre à plaque parallèle BML,
- le rhéomètre coaxial BTRhéom,
- le rhéomètre coaxial CEMAGREF-IMG,

- le rhéomètre coaxial RhéoCAD (mis au point par la société CAD Instrumentation avec l'aide de M. Vernet, ingénieur au CTG, et employé au LMDC).

Tous ces appareils mesurent le couple résistant du béton en fonction de la vitesse d'écoulement imposée (par mise en rotation de divers mobiles ou palettes). Ces deux données permettent ensuite d'obtenir, par différents calibrages, les grandeurs caractéristiques de l'écoulement du béton, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Cependant, la présence de granulats de tailles variées dans le béton ne permet pas de définir un matériau type pour tous ces rhéomètres qui servirait de référence à toutes les mesures. Par conséquent, étant donné les caractéristiques inhérentes à chaque rhéomètre, les comparaisons de résultats d'un appareil à l'autre ne sont pas forcément évidentes.

I.1.2.2. Capacités au remplissage (déformabilités)

Le béton autoplaçant doit pouvoir remplir des coffrages compliqué et densément armée sous l'effet de son propre poids et sans sollicitations, donc sans nécessiter d'intervention humaine pour aider à la mise en place. Cette caractéristique, nommée « capacité de remplissage »ou « la déformabilité » **[55]**. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton **[56]**.

En effet, un bon écoulement du béton se traduit par un faible seuil de cisaillement, et une viscosité suffisante pour assurer le maintien des granulats dans la suspension. Pour garantir ces critères il faut contrôler les facteurs qui influent sur la déformabilité :

L'augmentation du volume de pate ou la diminution du volume de granulats favorise l'écoulement **[56]**. Si on considère que pendant son écoulement, le béton est un matériau diphasique, et que les granulats baignent dans une suspension fluide (mortier).La réduction des frictions et frottement entre les granulats, par l'utilisation des granulats roulés

La fluidité de la pâte peut être assurée par l'ajout d'un superplastifiant qui agit en baissant fortement le seuil de cisaillement de la pâte, et celui du béton si les frottements intergranulaires sont minorés par un volume suffisant de pâte, et par la suite on peut assurer une bonne fluidité sans augmenter le volume d'eau dans le béton car l'utilisation excessive d'eau diminue considérablement la résistance à la ségrégation, et conduit à des faibles performances mécaniques du béton à l'état durci.

Les essais visant à évaluer le mieux le niveau de déformabilité d'un BAP sont :

- Etalement au Cône d'Abrams (Slump-Flow)
- Temps à T50 au cône d'Abrams (T50 Slump-Flow)
- Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel)
- Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test)
- Etalement au Tube Orimet (Orimet)
- Essai du caisson (Fill Box)

I.1. 2.3. Capacités de passage

C'est la capacité du béton à traverser les passages étroits et les zones fortement ferraillé avec le minimum de frictions possible, les chercheurs ont trouvé plusieurs raisons de blocage

- une séparation des phases du béton (liquide et solide) qui due à l'utilisation d'une quantité importante de granulats,
- l'augmentation de la quantité d'eau libre qui provoque une ségrégation,
- la taille des plus gros granulats soit assez grande par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement,
- dosage élevé ensuperplastifiants **[14]**,
- l'utilisation d'une quantité importante des fines mène aussi à un risque de blocage selon Ozawa et al. **[6]**.

Le schéma de la figure I.5 illustre le mécanisme de blocage entre deux armatures avant et au moment de blocage. Selon l'explication du phénomène par El barrak **[56],** à l'approche des armatures, une différence se crée entre la vitesse des granulats et celle de la pâte. Plus rapide, la pâte précède les granulats en passant à travers les armatures.

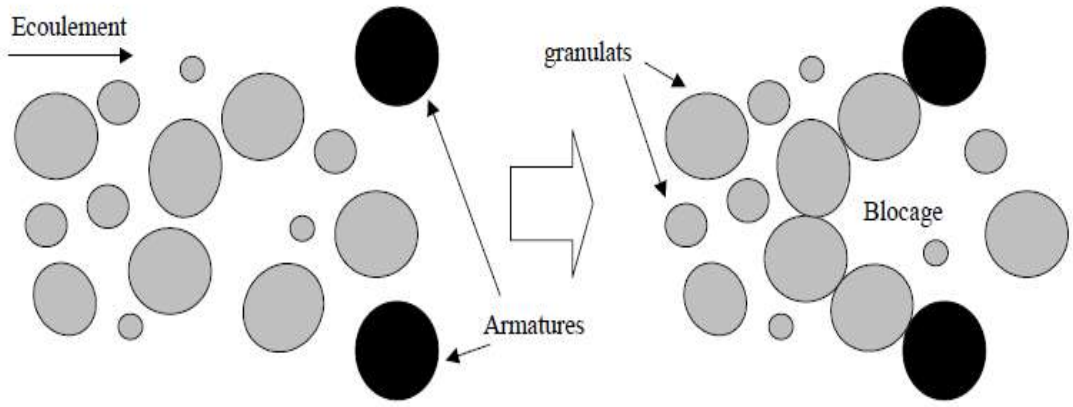


Figure I.5. Représentation en plan d'un blocage de granulat à travers deux armatures **[56]**.

Ainsi, la quantité de granulats est considérée localement plus grande avant les armatures et tend à augmenter avec l'écoulement du béton. Ce phénomène s'explique par le lessivage de la pâte à travers les granulats au niveau du passage entre les armatures **[57]**. Par conséquent, les frictions et les collisions entre les granulats sont plus importantes, et créent de multiples contacts entre les granulats à l'amont de l'ouverture entre les armatures, ce qui provoque la formation éventuelle d'un arc stable de granulats bloquant l'écoulement du béton. Le béton autoplaçant doit posséder donc une bonne capacité de passage à travers les armatures et dans les confinements. Ceci nécessite une quantité de gravier inférieure à celle d'un béton ordinaire, et de taille maximal plus petite.

Les essais qui permettent la vérification de la capacité de passage sont :

- Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test),
- Temps à T50 au cône d'Abrams en présence du J-Ring,
- Différence d'Hauteurs au J-Ring,
- Essai de la Boite en L (L-Box test) – Mesure de H2/H1,
- Essai de la boite en U (U-Box test).

I.1. 2.4. Stabilité

La stabilité d'un BAP à l'état frais est la capacité de suspension des particules de son squelette granulaire. Il existe deux types de stabilité, soit la stabilité statique et la stabilité sous écoulement.

Plus un BAP est stable plus le degré du tassement et de la ségrégation sont faible. Une bonne compacité du squelette granulaire d'un BAP diminue la quantité d'eau libre d'où la nécessité de bien choisir les granulométries et les formes des différents constituants.

La ségrégation des constituants du béton n'est pas seulement due à la différence des densités spécifiques, mais est grandement influencé par les collisions et les frictions intergranulaires directement liées à la viscosité du mortier **[16]**.

Le ressuage est un phénomène de montée d'eau à la surface juste âpre le coulage du béton. La cause est dans la formulation d'un mélange, où la quantité d'eau est plus élevée que celle nécessaire pour créer un lien stable dans l'ensemble avec d'autres constituants de ce mélange de béton, donc il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. L'eau libre dans le béton est généralement mobile et peut trouver son chemin vers la surface du béton par effet de gravité et de densité indépendamment des solides dans le mélange. Ceci à l'extrême se traduit par une couche de laitance en surface libre du béton.

Pour éviter la ségrégation, Des matériaux de surface granulaire plus élevée, peuvent par absorption et adsorption retenir une quantité supplémentaire d'eau libre. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité. L'essai de la résistance à la ségrégation des BAP est l'essai au tamis de 5 mm, et la capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC).

I.1.2.5. Bilan

Un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, pour avoir toutes ces propriétés presque contradictoires, il faut bien choisir les matériaux et trouvées la bonne composition en suite vérifier le béton par les essais nécessaires, Le tableau I.1 résume ces étapes.

Tableau I.1. Les propriétés et les essais essentiels des BAP à l'état frais.

<table>
<tr><th></th><th>Moyen d'obtention</th><th>Les précisions dans la formulation</th><th>Les essais à réalisé</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Capacités au remplissage</td><td rowspan="3">Réduction des frictions intergranulaires</td><td>Augmentation du volume de pate (diminution de volume de gros granulat)</td><td rowspan="4">• Etalement au Cône d'Abrams
• Temps à T50 au cône d'Abrams
• Temps d'écoulement à l'entonnoir en V
• Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars
• Etalement au Tube Orimet
• Essai du caisson</td></tr>
<tr><td>Utilisation d'un liant de granularité continu</td></tr>
<tr><td>Optimisation du rapport G/S</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Augmentation de la fluidité de la pate</td><td>Utilisation d'un superplastifiant</td></tr>
<tr><td>Optimisation du rapport E /C, S/M.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Capacités de passage</td><td rowspan="2">Réduction de blocage des granulats</td><td>Réduction de volume de gravier</td><td rowspan="4">• Etalement au J-Ring
• Temps à T50 au J-Ring
• Différence d'Hauteurs au J-Ring
• Essai de la Boite en L Mesure de H2/H1
• Essai de la boite en U</td></tr>
<tr><td>Réduction la taille maximal des granulats</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Accroitre la cohésion pour réduire le tassement des granulats</td><td>Adoption d'un petit rapport Eau/Liant</td></tr>
<tr><td>Utilisation d'un agent de viscosité</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Stabilité</td><td rowspan="4">Réduction de la séparation de phases</td><td>Réduction de rapport E/C</td><td rowspan="4">• Essai de stabilité au tamis de 5 mm
• Essai de tassement</td></tr>
<tr><td>Utilisation d'agent de viscosité</td></tr>
<tr><td>Réduction de la taille maximale des granulats</td></tr>
<tr><td>Limitation de la teneur en granulat</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Minimisation de ressuage</td><td>Réduction de rapport E/C</td><td rowspan="3">• Essai à l'aéromètre modifié</td></tr>
<tr><td>Utilisation de matériaux de grandes surfaces spécifique</td></tr>
<tr><td>Utilisation d'agent de viscosité</td></tr>
</table>

I.1.3. Caractéristiques mécaniques à l'état durci

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons, supposées différentes de celles des bétons vibrés.

I.1.3.1 Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques sont des qualités très essentielles pour un béton tout comme le BAP car elles donnent généralement une image globale de la qualité d'un béton

L'évolution des résistances des BAP sous des conditions comparables semble être voisine aux bétons ordinaires **[58]**. Aux très jeunes âges, les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de superplastifiants car un dosage trop élevé pouvant conduire à un retard de prise considérable, ainsi qu'il est possible d'atteindre des résistances mécaniques élevées au démoulage en optimisant le choix et le dosage en adjuvant. En fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours.

- Résistance à la compression

La résistance à la compression est la contrainte maximale sous laquelle une éprouvette du béton se rompt. Domone **[11]** a analysé 68 cas à travers le monde où le BAP a été utilisé. Cet auteur a rapporté que la résistance à la compression des BAP est comprise entre 20 et 100 MPa, et que plus de 80% des mélanges testés ont des résistances supérieures à 40MPa. Ceci montre qu'en utilisant des BAP, il est possible d'obtenir une gamme de résistances allant de faible (20 MPa) à haute (100 MPa).

La résistance à la compression est influencée par plusieurs facteurs, un béton Autoplaçant avec un rapport E/P similaire, aura généralement une résistance légèrement plus élevée en comparaison à celle du béton ordinaire à cause du manque de vibration donnant une meilleure interface entre les agrégats et la pâte durcie **[58]**. La structure d'un béton autoplaçant est donc supposée être plus compacte et plus homogène que le béton ordinaire vibré, conférant au béton autoplaçant une amélioration de résistance mécanique **[56]**.

Pineaud **[59]** montre que l'influence du rapport E/P est comparable à celle obtenue par d'autres auteurs sur des BV, ou l'augmentation de ce dernier mène à une diminution de la résistance à la compression,

Un autre élément influençant la résistance à la compression est le volume de la pâte. Turcry et al. **[60]** montre que le volume de pate a un effet réel mais limité sur la résistance en compression. Une diminution de 12% de la résistance est observée pour une augmentation de volume de pate à 57%. De même, Pineaud **[59]** constate que le volume de pate a une faible influence sur la résistance en compression.

Du moment que le BAP est formulé avec un faible rapport E/P (0,28 à 0,42) et une teneur en poudre élevée (450 à 600 kg/m3), sa résistance à la compression est plus grande que celle du béton vibre **[52]**.

En ce qui concerne l'effet des ajouts minéraux sur la résistance du BAP, plusieurs chercheurs ont rapporté l'effet bénéfique des ajouts pouzzolaniques, alors que d'autres chercheurs ont montré l'effet négatif des fillers calcaires sur la résistance à la compression du BAP.

Uysal et Yilmaz **[61]** ont étudié l'effet de la poudre de marbre, poudre de calcaire et poudre de basalte sur les propriétés des BAP. Ces auteurs ont rapporté que la résistance diminue au fur et à mesure que la teneur en addition augmente.

- Résistance à la traction

En général, la résistance à la traction dépend de la résistance à la compression. En effet, l'augmentation de la résistance à la compression mène vers l'augmentation de la résistance à la traction.

Pour une résistance à la compression d'un BAP similaire à celle d'un béton vibré, la résistance à la traction peut être assumée à être la même, mais comme la résistance à la compression des BAP est généralement supérieur à celle des bétons vibres, la résistance à la traction des BAP est également supérieur **[9]**.

Dehwah **[62]** a trouvé des résistances à la traction qui varient entre 4,9 et 6,5 MPa. Des BAP confectionnes à base de différente teneur en cendres volantes ont développé des résistances qui varient entre 1,55 et 2,4 MPa.

Dans leur article sur les BAP légers à haute résistance, Choi et al.**[63]** ont trouvé une relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction comparable à celle donnée par les règlements de Béton Armé. La relation proposée est : $f_s=0.076f_{ck}+0.5582$.

Contrairement Klug **[58]** a trouvé que la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés, elle peut aller jusqu'à 40%. Ce qui implique une nécessité de revoir la section minimale de ferraillage.

Selon Guneyisi et al. **[64]** la variation de la résistance à la traction d'un béton contenant du laitier est similaire à celle d'un béton sans laitier. En général la résistance à la traction est en baisse avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange, exception est faite pour les dosages en laitier à 50 et 60% dans le cas de 90 jours de cure dans l'eau.

I.1.3.2Module d'élasticité

Le module d'élasticité statique est le rapport entre la contrainte et la déformation qui la correspond dans le domaine élastique. Ce paramètre est lies à la résistance à la compression du béton. En effet, l'augmentation de résistance à la compression mène vers l'augmentation des modules d'élasticité **[61]**. Nassif et al. **[65]** attestent que le module d'élasticité est proportionnel à la racine carrée de la résistance à la compression et que plus la résistance est élevée plus le module d'élasticité est élevé.

Selon certains auteurs **[52-56]**, les modules d'élasticité des BAP ne diffèrent pas significativement de celles du béton ordinaire pour la même classe de résistance. Contrairement, Assié **[53]** a trouvé que, même si les BAP présentaient une meilleure résistance à la compression que les bétons ordinaires, la quantité plus élevée de pâte dans les BAP a généré une réduction dans le module d'élasticité ce qui affirmé par Felekoglu et al **[66]**.

Pons et al. **[67]** ont réalisé des mesures de module instantané sur quatre bétons autoplaçants. Les résultats confirment la tendance prévue par le modèle d'homogénéisation du LCPC. Les modules instantanés des BAP sont systématiquement plus faibles, et le coefficient« k » varie de 7 850 à 9 700 pour les quarte bétons autoplaçants, mais l'écart avec le module du béton ordinaire est inférieur à 10%, ce qui ne pose pas de problème vis-à-vis desrèglements.

Cette propriété est affectée par le volume de la pâte, le volume et la qualité des gravillons **[68]**. Autres auteurs **[54, 57]** ont rapporté que du fait du faible volume et de la taille maximale réduite des gravillons et du volume de pate élève, les modules d'élasticité des BAP sont un peu faibles par comparaison à ceux des bétons traditionnels. Ce qui peut être expliqué par le fait que la dureté des gravillons est plus grande que celle de la pâte.

Des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires vibrés à résistance mécanique égale sont testés par Benkechkech **[55]**, Pour des rapports gravier sur sable G/S similaires, le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des BO. Par ailleurs, pour des rapports G/S différents, le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui de béton ordinaire, Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons autoplaçants. En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leur module respectif (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats).

L'effet de l'utilisation des ajouts minéraux dans les BAP sur les modules d'élasticité a été étudié par plusieurs chercheurs **[61, 69]**. Les résultats trouvés montrent que la substitution du ciment par des ajouts minéraux de différents types (inerte, hydraulique ou pouzzolanique) conduit vers la diminution des modules d'élasticité.

Le module d'élasticité des BHP utilisant le laitier et la fumée de silice augmente avec l'âge, et le taux d'augmentation devient moindre à l'approche de 28 jours, plus encore l'addition des cendres volantes réduit le taux d'augmentation du module d'élasticité avec l'âge **[65]**.

I.1.3.3. Vitesse de propagation d'ondes (VPO)

La vitesse de propagation d'ondes est une mesure non destructive qui vise à examiner la structure interne du béton, c'est-à-dire la présence des vides et fissures. En effet, la présence des vides et fissures réduit la VPO et par conséquent la qualité du béton.

En général, les BAP présentent des VPO élevées allant dans certains cas à 5000m/s, ce qui peut être dû au fait que les BAP sont formulés avec une teneur en fines élevée qui rend leur microstructure plus danse et leurs pores plus petites. C'est pour cette raison que les BAP possèdent d'excellentes qualités **[61, 64]**.

I.1.4 Caractéristiques physico-chimique et durabilité

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses sollicitations et agressions, Il doit satisfaire, sans perdre ses performances, aux besoins des utilisateurs au cours du temps.

Il devient possible de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction). Les règles applicables pour les bétons courants restent donc normalement applicables aux BAP. La durabilité est une propriété qui a été relativement peu étudiée pour les BAP jusqu'à présent. Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et la résistance au gel - dégel. Les caractéristiques microstructurales des BAP sont principalement influencées par:

- un volume de pâte élevé,
- la présence d'additions en quantité importante,
- un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

Les altérations du béton observées en présence d'agents agressifs, qu'ils soient minéraux, organiques ou biologiques, sont d'ordre chimique ou physique.

Les altérations physiques peuvent être surfaciques (abrasion, érosion, cavitation ou écaillage) ou interne sous forme de fissures (changement structural, gradients d'humidité ou de température, pression de cristallisation, exposition aux températures externes)

Les altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, aux bases et aux solutions salines, elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en association avec cette dissolution, la formation de composés nouveaux **[70]** dont les conséquences sont d'ordre macroscopique :

- Mécanique : chute de résistances et de rigidité, fissuration et déformation du matériau.
- Physico-chimique : baisse du pH, augmentation de la porosité et des propriétés de transfert des gaz et des liquides.

L'action des ions sulfate issus du gypse, utilisé comme retardateur de prise, ne présente pas un danger pour les bétons car l'hydrate formé est certes expansif, mais cristallise dans une pâte de ciment fraîche et plastique qui supporte les déformations induites. Par contre en cas d'attaque externe après la prise, la cristallisation de l'hydrate se fait dans la porosité d'une matrice peu déformable. L'expansion de l'éttringite peut alors donner naissance sur les parois du réseau poreux à des pressions de traction causant expansion, fissuration voire éclatement du béton **[55]**.

I.1.4.1Absorption d'eau

Deux phénomènes d'absorption d'eau sont possible dans le béton, une absorption par immersion lorsque le béton est totalement immergé dans l'eau et une absorption par capillarité lorsque le transfert de liquides dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires. Ce mécanisme de transfert n'est pas seulement lié à la structure poreuse mais aussi à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). Etant donné que le remplissage des capillaires et des vides ont lieu en même temps que la montée de l'eau durant l'absorption, L'absorptivité est influencée en premier lieu par le rapport E/C. D'autre part, plus le taux d'humidité du béton est élevé, plus la valeur mesurée d'absorptivité est faible.

La formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau inferieur à celles des bétons vibrés. Selon Kapoor et al.**[69]**, la valeur d'absorption d'eau par immersion des BAP est 1% contre 2% pour les bétons vibres. Et même pour l'absorption capillaire **[30]**, présente des valeurs inferieurs à celles des bétons vibrés et elles sont d'autant plus faibles qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes.

Contrairement, Assie **[53]** a cité des résultats donnés par Boel **[72]** (tableau I.2) qui prouvent que l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est analogue à celle des bétons vibrés correspondants (SCC1 et TC1). Ces deux grandeurs augmentent avec le rapport E/C (SCC4 a un rapport E/C de 0,36 et SCC2-SCC7 de 0,55) par suite de l'augmentation du nombre de pores et de leur taille. L'influence du filler calcaire est bénéfique pour l'absorption capillaire et néanmoins néfaste pour l'absorption par immersion (SCC5 et SCC7).

TableauI.2. Absorption d'eau par immersion et par capillarité de sept BAP et un béton vibré Boel **[72]**.

Typesde béton	**Absorptionpar immersion (% de masse)**	**Absorption capillaire après 24 heurs**	
		Augmentation de masse (g)	**Hauteur (mm)**
SCC1	4.8	37	25
SCC2	5.0	49	31
SCC3	4.7	23	18
SCC4	4.2	19	17
SCC5	5.1	33	23
SCC6	4.1	25	21
SCC7	6.1	26	29
TC1	4.9	43	44

I.1.4.2Perméabilité à l'eau

La perméabilité est l'aptitude d'un béton de résister à la pénétration d'eau. Elle dépend principalement de la porosité du béton. Grace à leur teneur en fines élevée, les BAP sont caractérises par une faible perméabilité par comparaison aux bétons vibres pour la même classe de résistance **[64]**.

Selon Hou et al. **[73]** l'invasion de substances nocives dans le béton est une question de fluidité. Ceci est gouverné par la loi de Darcy. La perméabilité à l'eau est étroitement liée aux dimensions des pores dans le mélange, plus les pores sont larges plus grande est la perméabilité. Si le rapport Eau/Ciment est en dessous de 0,32 et l'hydratation est complète, il n'y aura pas de pores capillaires. Pour une cure de 90 jours, plus le rapport E/C est faible plus la perméabilité du béton est faible, Pour les bétons contenant du laitier, les pores capillaires (diamètre supérieure à 0,01µm) sont transformées en pores gélives (diamètre inférieure à 0,01µm), ceci est dû à la réaction pouzzolanique qui améliore la densification du béton.

I.1.4.3Perméabilité au gaz

La mesure de la perméabilité aux gaz permet de quantifier la mobilité d'un fluide à travers un béton dans sa globalité. Cependant, le béton est un matériau dont les propriétés évoluent dans le temps et pour lequel la dessiccation a pour effet de modifier le réseau poreux.

La perméabilité au gaz est influencée par le rapport E/C, taux de saturation et la pression d'essai **[73]**. Une augmentation du rapport E/C conduit à une forte perméabilité et une diminution d'influence du taux de saturation sur la perméabilité.

Les résultats d'essais de la perméabilité aux gaz fait par Assié **[53]**, mènent à une conclusion qu'un béton autoplaçant est plus résistant à la pénétration d'un gaz tel que l'oxygène qu'un béton vibré même si les deux béton ont la même résistance à la compression (figureI.6), et c'est la même conclusion de Zhu **[71]**.

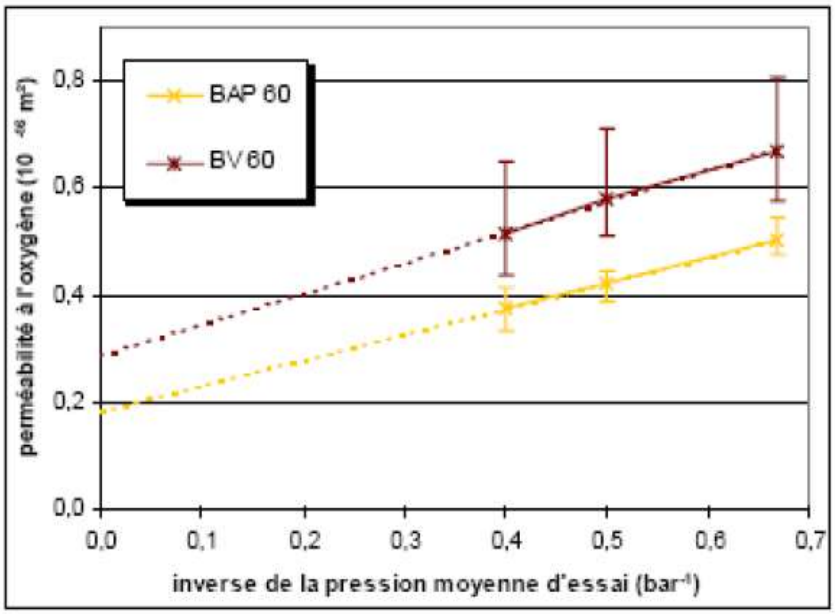


Figure I.6. Perméabilité à l'état sec d'un béton autoplaçant et un béton vibrée **[53]**.

Certaines études publiées ont en effet montré que les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent aux BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés de même rapport E/C **[53]**.

I.1.4.4Perméabilité aux ions Chlore

Les bétons sont considères comme des milieux alcalins (grâce à leur PH élève). L'alcalinité du béton conduit vers la formation d'une couche d'oxydes qui protège les armatures contre la corrosion. On dit alors que les armatures sont passivées. Néanmoins, la pénétration des

chlorures à travers les réseaux poreux du béton véhiculés par l'eau peut entrainer une dépassivation, voire une corrosion des armatures lorsque la teneur en chlorures dépasse certaines limites **[23]**.

Toujours en comparaison aux bétons vibrés, Kapoor et al **[69]** ont rapporté que, les BAP présentent une résistance plus grande à la pénétration des chlorures. D'autres auteurs observent expérimentalement que les BAP possèdent des coefficients de diffusion des ions chlore équivalents **[73, 74]**, par contre certains auteurs **[75]** ont évalué le comportement de bétons autoplaçants et de bétons vibrés soumis à un essai de migration des ions Chlore sous un champ électrique. Malgré un rapport E/C plus faible (0,4 contre 0,5 pour le béton vibré), le BAP s'est avéré moins résistant à la migration des ions chlore. Les coefficients de diffusion du BAP, calculés à partir de ces essais, sont 2 à 3 fois supérieurs à ceux du béton vibré (31 à 56.10-12 m²/s au lieu de 15 à 18.10-12 m²/s). Selon ces auteurs, ces faibles performances pourraient être attribuées à une mauvaise dispersion de l'addition calcaire.

La diffusion des ions chlore à travers le béton varie aussi avec le rapport E/C mais l'influence de ce dernier sur la diffusion est bien moindre que sur la perméabilité qui est le facteur le plus influençant sur la diffusion des ions chlore.

L'utilisation des ajouts minéraux a un effet bénéfique sur l'augmentation de la résistance à la pénétration des chlorures des BAP, c'est le résultat de plusieurs chercheurs, A titre d'exemple

Selon Khayat **[16]**, La perméabilité aux ions chlore à 28 jours mesurée sur quelques formulations de bétons autoplaçants qui ont été analysées, peut être qualifiée de faible à modérée pour les bétons autoplaçant avec ajouts minéraux et élevée pour le cas de 100%ciment, ceci peut être attribué à l'amélioration de la zone de transition entre la pâte de ciment et le granulat dans le cas des bétons avec ajouts

Le remplacement partiel du ciment par de la fumée de silice (jusqu'à 20%) peut contribuer à réduire la perméabilité aux ions chlore et ceci pour des bétons de rapports E/C de 0,40 et 0,50, ayant subi une cure humide pendant 7 jours et à l'air pendant 6 mois.

Siddique **[76]**, qui a étudié l'influence des cendres volantes, rapporte que la pénétration des ions de chlorures dans les BAP est très faible et qu'elle diminue avec l'augmentation du taux de remplacement du ciment par des cendres volantes, ce qui peut être dû à la forme sphérique des particules de cet ajout qui contribue à l'améliorent de la compacité de la matrice.

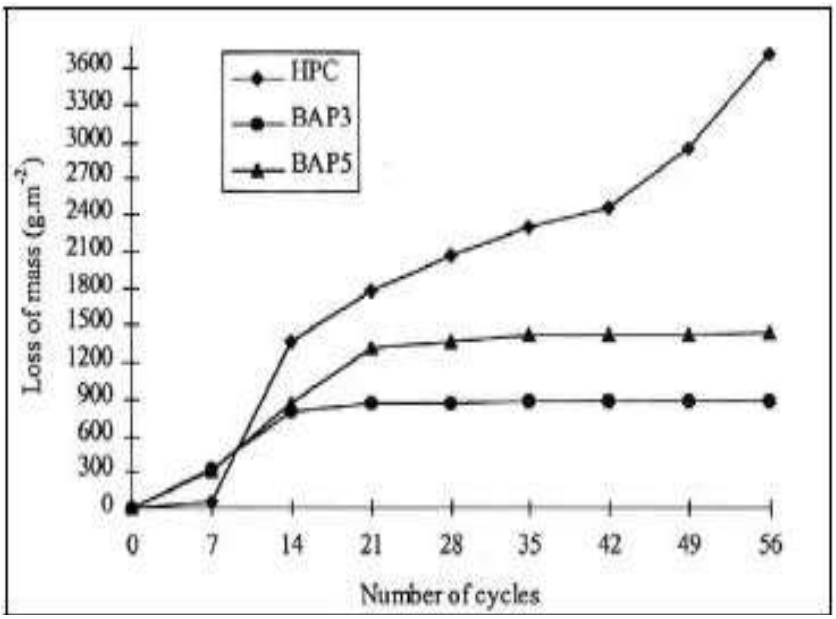
I.1.4.5Gel-Dégel des BAP

L'un des facteurs qui peut nuire la durabilité des bétons est l'effet du gel-dégel. Cet effet se produit quand l'eau pénètre à l'intérieur du béton et se gèle. Ce gel interne du béton peut provoquer des dommages (microfissuration interne, gonflements, puis éclatement du béton).La répétition des cycles gel-dégel favorise la propagation des fissures et peut conduire à la destruction totale de l'élément en béton **[23]**.

Du à leur microstructure interne danse qui réduit la perméabilité, les BAP présentent une meilleure résistance à l'effet gel-dégel **[64]**.

Plus le bon choix du rapport E/C, la qualité des agrégats et la quantité d'air dans le mélange et les conditions de cure. L'utilisation d'un adjuvant entraineur d'air est la meilleure approche pour la prévention contre l'attaque du gel dans le béton

Les résultats présentés dans la littérature montrent nettement que les BAP sont plus résistants au gel-dégel que les bétons vibrés (de même rapport E/C, avec ou sans entraîneur d'air) **[64, 74, 75,77]**.Le tableau I.3 et le grapheI.7 présentent respectivement les résultats de Mortsell **[74]** et Rougeau **[77]**.



FigureI.7. Perte de masse de deux BAP et un béton vibré pendent un test d'écaillage **[77]**.

TableauI.3. Résultats d'un essai d'écaillage (résistance au gel-dégel) d'un BAP et un béton vibré **[74]**.

Type de béton	N° de cycles					Rapport m_{56}/m_{28}
	4	14	28	42	56	
	Ecaillage (Kg /m^2)					
Béton vibré	0.18	0.52	1.21	1.82	2.45	2.02
Béton autoplaçant	0.06	0.12	0.22	0.27	0.31	1.41

Ainsi que Lang et al. **[36]** ont montrés que contrairement au ciment portland les ciments au laitier ont une grande résistance au gel-dégel.

I.1.5Méthode de formulation des BAP

Plusieurs méthodes de formulation des BAP sont présentées dans la littérature.

I.1.5.1. Méthode Japonaise

La méthode japonaise développée par OKAMURA et OZAWA est l'une des premières méthodes mises au point pour la formulation des bétons autoplaçants **[26]**. La méthode préconise l'augmentation du volume de la pâte au détriment du volume des granulats. Le volume des gravillons est limité au maximum à 50% au volume solide du béton et ceci dans le but d'éviter tout risque de blocage. Afin d'assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable de diamètre supérieur à 90 µm est égal à 40% du volume total du mortier.

Les mortiers sont caractérisés par un essai d'étalement au cône et un essai d'écoulement à l'entonnoir (Figure I.8).

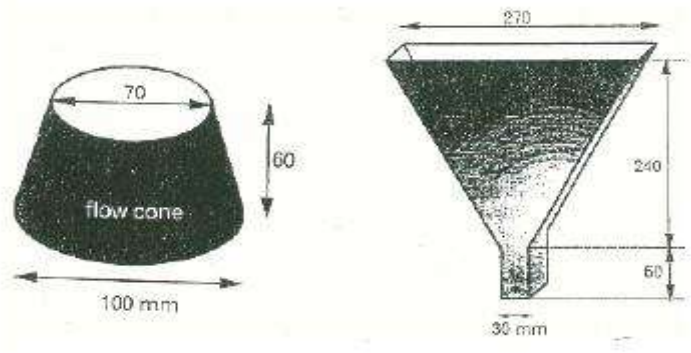


Figure I.8. Cône et entonnoir pour mesurer l'étalement et le temps d'écoulement des mortiers **[26]**.

Les essais réalisés ont conduit les chercheurs à définir deux grandeurs :

- L'étalement relatif (fluidité) : $\Gamma m = (d_2-d_{02}) / d_{02}$,
- La vitesse relative d'écoulement : Rm = 10/t.

Où : d (mm) : est le diamètre final de la galette ;

d_0 (mm) : est le diamètre inférieur du cône (100 mm) ;

t (s) : est le temps d'écoulement à l'entonnoir.

Plus la valeur de Γm est élevée, plus le mortier est fluide et plus la valeur de R_m est faible, plus la viscosité est élevée. Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément $\Gamma_m=5$ et $R_m=1\pm0,1$. Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant satisfaisant.

I.1.5.2. Méthode Française (LCPC)

Elle est basée sur le concept du modèle de suspension solide. Ce modèle est un modèle analytique permettant un calcul théorique de la compacité d'un mélange granulaire à partir des caractéristiques des constituants, des proportions du mélange et de la distribution granulaire. Un arrangement idéal du squelette granulaire permet d'obtenir une résistance accrue et une meilleure fluidité. La formulation peut être établie selon les procédures suivantes :

- Une combinaison de liants est à priori fixée pour laquelle le dosage en superplastifiant est choisi. La demande en eau du liant est mesurée en présence du superplastifiant,
- Les calculs sont élaborés en utilisant le modèle de suspension solide en tenant compte du confinement. La viscosité relative est arbitrairement fixée à 5.104 Pa.s,
- Le rapport additions minérales/ciment est gardé constant pendant que les proportions des granulats et de liant sont optimisées,
- Le dosage en superplastifiant est ajusté de façon à obtenir l'étalement désiré (60 à 70 cm).

I.1.5.3. Méthode Suédoise (CBI)

La méthode de formulation suédoise est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures, et le volume des granulats dans le béton. Les auteurs **[80]** ont montré que pour une taille de granulat donnée, il existe une teneur critique en dessus de laquelle le blocage est absolu. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats), et de la forme des granulats (roulés ou concassés). Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide.

La méthode CBI consiste à déterminer le risque de blocage Rb par la relation :

$R_b = \sum Vi / Vcrit, i$ Equation I.3

Où Vi : la proportion volumique des granulats de taille di,

Vcrit,i : la teneur volumique critique de cette fraction granulaire de taille di.

Une valeur de Rb proche de 1 indique une forte probabilité de blocage.

I.1.5.4. Méthode JSCE

Cette méthode a été présentée par la « Japanese Society of Civil Engineers (JSCE) ».Dans cette formulation, la quantité d'eau, le rapport eau/poudres et la teneur en poudre varient en fonction de l'utilisation ou non d'un agent de cohésion. Les points principaux de cette formulation sont :

- Le diamètre maximal des granulats est limité à 20 mm. Le volume des gros granulats varie de 0,30 à 0,32 m^3/m^3 de béton ; Il peut être plus important pour une faible fluidité.
- En présence d'un agent de viscosité, la quantité d'eau est inférieure à 180 kg/m3 dans les conditions d'exposition normales. Si la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, cette valeur peut aller jusqu'à 190 kg/ m^3. En l'absence d'un agent de viscosité, la quantité d'eau doit être comprise entre 155 et 175 kg/ m^3 ;
- Le rapport E/P dépend des propriétés du béton dans le cas d'utilisation d'un agent de viscosité, dans le cas contraire, il doit être compris entre 28 et 37 % en masse ;

- La quantité d'air est en fonction de la dimension maximale du granulat, la résistance demandée et des conditions environnementales. La valeur type est de 4,5% d'air ;
- La quantité de sable est obtenue par déduction des quantités de gravier, eau, poudre ;
- Le dosage de superplastifiant est déterminé à partir des expériences précédentes et fiches techniques des fabricants ; La teneur en agent de viscosité est variée selon le type d'agent.

I.2 Effets des additions minérales

La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation. Ainsi l'incorporation des ajouts minéraux à la formulation de béton comme substituant du ciment qui est le produit le plus cher, contribue à réduire le coût du béton et la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, et par conséquent l'émission du CO_2 de l'industrie cimentière dans la nature. D'autre part leurs utilisations ont pour objectif d'améliorer les caractéristiques du matériau à l'état frais et à l'état durci pour augmenter sa résistance et sa durabilité.

I.2.1 Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. A l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés et pour certaines peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaires pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire.

Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes **[82-87]**, s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire.

a. Un effet granulaire appelé aussi effet filler résultant des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau et éventuellement d'adjuvant et qui agit sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires **[1]**, Cet effet granulaire peut être favorable ou défavorable en raison de plusieurs facteurs tels que la morphologie, la surface texturale, la distribution granulaire ; qui influent sur la rhéologie des matériaux cimentaires **[89, 90]**. Il agit dès le malaxage sur toutes les étapes de mise en œuvre et influe sur la densité du squelette granulaire ainsi que sur la stabilité des mélanges frais.

Lorsque les particules de l'addition modifient peu les frictions inter granulaires et parviennent à remplir les porosités du squelette granulaire (ciment et granulats) en libérant l'eau contenue dans ces pores, l'effet granulaire devient favorable et conduit soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais à quantité d'eau constante soit à la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange et les performances mécaniques du matériau durci. Contrairement, lorsque les particules de l'addition modifient considérablement les frictions inter granulaires dans les mélanges cimentaires ou ne parviennent pas à remplir les porosités du squelette granulaire, l'effet granulaire devient dans ce cas, défavorable **[86]**.

D'autre part, l'analyse des travaux publiés, ne permet pas encore de disposer d'une approche suffisamment construite et approfondie qui permette de prévoir l'effet que peut produire une addition donnée dans une formulation et de ce fait, nous ne maîtrisons pas encore les critères de choix des additions pour améliorer les propriétés rhéologiques ou la compacité d'une formulation donnée **[88]**.

b. Un effet physico-chimique et microstructural engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement.

De nombreux auteurs sont unanimes sur le fait que l'introduction des additions minérales dans un mélange cimentaire modifie le processus d'hydratation du ciment indépendamment de la nature de l'addition **[82-87]**.

De même Jiang et Van Damme **[91]** ont montré en étudiant l'action des additions siliceuses et calcaires sur le processus d'hydratation du C_3S pur que la quantité de chaleur dégagée au cours des premières 24 heures dans une pâte cimentaire est modifiée par l'incorporation de différents pourcentages d'additions

D'autre part, Lawrence et al. **[84]** ont également montré en étudiant l'effet des additions minérales inertes sur l'hydratation des mortiers, que le degré d'hydratation à courts termes des mortiers contenant des additions chimiquement inertes était toujours plus important que celui des mortiers de référence sans additions, et ont ainsi confirmé l'amélioration de l'hydratation du ciment avec des additions minérales inertes .

Dans le domaine microstructurale et microchimique, Ramlochanet al. **[92]**, ont montré en étudiant les effets de la pouzzolane et du laitier sur l'expansion des mortiers (figure 1.8), que :

- L'incorporation de la pouzzolane et du laitier dans un mélange cimentaire, modifiait le produit interne de la phase alite, mais ce produit ne diffère pas significativement par rapport au cas du ciment seul,
- Les sulfates et les aluminates étaient proportionnés différemment parmi les pores liquides et les phases solides,
- La microstructure du matériau cimentaire était modifiée,
- La formation de l'ettringite n'était pas expansive.

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer l'action des additions sur le processus d'hydratation du ciment. Certains auteurs considèrent que la présence des additions minérales multiplie les possibilités de germination des produits hydratés du ciment et facilite ainsi la formation d'une structure solide garantissant les premières résistances mécaniques **[30, 31]**. D'autres auteurs expliquent que la présence des additions minérales dans un mélange cimentaire entraîne une augmentation du rapport effectif eau/ciment et conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment en conduisant à une structuration de la matrice cimentaire plus efficace **[83]**. D'une manière générale, on peut conclure que l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques ainsi que sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis.

c. Un effet chimique est intiment lié à leur composition minéralogique et concerne la capacité des additions caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment. La norme européenne EN 206-

1 désigne les additions chimiquement actives comme étant du type II, en prenant en compte leur activité hydraulique latente ou leur activité pouzzolanique.

D'une manière générale, la réaction pouzzolanique concerne principalement : Les fumées de silice, les cendres volantes siliceuses (classe F), les pouzzolanes naturelles et les schistes calcinés. La silice amorphe présente dans ces différentes additions réagit en présence de l'eau avec la portlandite $Ca(OH)_2$, formée durant l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés C-S-H suivant la réaction suivante :

$$S + x\,CH + y\,H \longrightarrow C_xSH_{x+y}$$

L'activité hydraulique concerne plus particulièrement les laitiers de hauts fourneaux et les cendres volantes calciques (classe C), qui en raison du caractère basique du milieu cimentaire, peuvent produire des C-S-H dont le rapport C/S est différent de celui issu des réactions pouzzolaniques.

Par ailleurs, les additions calcaires présentent aussi une réactivité en présence des produits hydratés du ciment **[88]**. Dans ce cas, la calcite ($CaCO_3$) réagit avec les aluminates du ciment (C_3A, C_4H_{13}) en présence de l'eau pour former un mono-carbo-aluminate de calcium hydraté du type $C_3A.CaCO_3.11H_2O$, cristallisant en fines plaquettes hexagonales.

Toutefois, l'activité chimique des additions calcaires est significativement plus faible que celle des additions siliceuses à caractère pouzzolanique.

Il en résulte que l'effet chimique lorsqu'il est favorable, est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Son action sur les propriétés du matériau durci peut être quantifiée par la mesure du volume et de la nature des produits hydratés formés. Néanmoins, leur forte synergie rend difficile toute distinction claire entre ces deux effets et fait qu'ils peuvent être associés dans une notion unique plus large qui est la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment **[87]**.

I.2.2 Action des additions minérales sur les propriétés des bétons autoplaçant

Les ajouts minéraux substituant le ciment peuvent être classés sur la base de la source de chaque produit d'où on trouve :

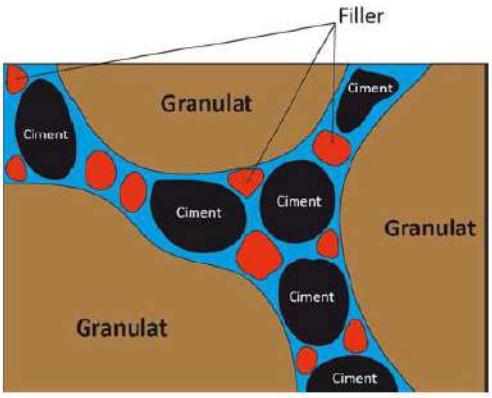
- Les produits artificiels : Désignés par le laitier des hauts fourneaux, les cendres volantes, la fumée de silice, l'argile calcinée (métakaolin), les déchets d'incinération et les déchets de briques concassées.

- Les produits naturels : Définis par la pouzzolane naturelle, le calcaire, l'argile opaline et les additions siliceuses (sable).

L'intérêt est maintenant focalisé sur le rôle joué dans le matériau autoplaçant par les additions minérales qui sont très peu coûteux et disponibles en Algérie, comme le laitier d'EL-Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni-saf.

I.2.2.1 Les fillers calcaires

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires (NFP18-508), provenant du gisement de roches calcaire pouvant être dolomitiques, massives ou meubles. L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement, s'insère dans le squelette granulaire du ciment (FigureI.9) et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci **[93]**.



FigureI.9. Illustration de l'effet fillers **[93]**.

- Influence des fillers calcaires sur le béton frais

L'utilisation d'un filler permet par définition de combler les vides entre les grains de dimensions plus importantes du ciment. Cela conduit à la réduction de la demande en eau de la pâte de ciment ainsi obtenue **[94]**. Cet effet bénéfique est expliqué par SCHMIDT **[95]** :« Les particules fines déplacent une partie d'eau des vides entre les particules les plus grosses, la rendant disponible comme lubrifiant interne additionnel. Ainsi le béton est moins ferme et la conservation d'eau est améliorée », les fines calcaires contribuent également au maintien de l'homogénéité des bétons en augmentant la cohésion et en s'opposant à la ségrégation **[96]**.

Selon M.Nehdi **[29]** Neto et Campitelli observent la réduction du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire, et aussi l'augmentation de la viscosité plastique au-delà d'une certaine valeur de la finesse du calcaire. Brookbans (cité par **[29]**), a étudié l'effet de l'addition de 5 à 28% de poudre calcaire au ciment sur les propriétés du béton frais ,il a observé que le temps de prise est réduit quand on augmente le taux de fillers et que ces derniers réduisent beaucoup la quantité d'eau et probablement n'ont pas un effet d'entraîneur d'air. Puisque les fillers calcaires sont composes de particules de dimensions inferieures à 125µm, leur surface spécifique va jouer un rôle prépondérant sur l'écoulement en suspension **[97]** ; Pour des finesses proches, le besoin en eau est plus important pour les mortiers avec additions de pouzzolanes que pour les mortiers avec additions calcaires quel que soit la nature du ciment utilisé dans le mélange **[88]**.

- Influence des fillers calcaires sur les propriétés mécaniques

Il est montré que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pate, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de 10% **[79, 98]**. Au-delà, l'effet du filler n'entraine pas de modification des résistances ou alors entraine une diminution. Cette influence positive du filler sur les résistances mécaniques des bétons peut être expliquée par deux phénomènes :

- Amélioration de la densité de la matrice générale du béton et plus spécifiquement de la zone de transition pate-granulats **[80]**.
- Influence sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation **[81]** mais également en modifiant les produits d'hydratation formés **[99]**.

Plusieurs études **[100, 101]** ont observé que cette amélioration est à jeune âge et que les résistances diminuent à 28jours. Kakali et al. **[101]**, ont montré que la teneur en eau liée (non évaporé), déterminée par essai de thermogravimétrie est plus élevée dans les pates de ciment avec ajout calcaire en comparaison au ciment sans ajout calcaire. Ceci indique que le calcaire améliore la réactivité du clinker et exploite son potentiel hydraulique. D'autre part, le contenue de $Ca(OH)_2$ dans la pâte de ciment au calcaire est plus élève que de celle sans calcaire. Cette augmentation indique une accélération d'hydratation de silicates de calcium.

Schmidit **[95]** a observé que la résistance des ciments n'est pas normalement réduite par l'addition de 5-10% de calcaire, mais l'effet de dilution est vu à des dosages plus élevés à moins que le ciment soit plus finement broyé ce qui est prouvé par Notat **[102]**, Dans un tel

cas, le calcaire n'entre dans aucune réaction chimique, l'accélération de l'hydratation du silicate tricalcique est due à un effet physique dit de «nucléation hétérogène » : les germinations du silicate de calcium hydraté se produisent plus facilement au contact des cristaux de calcite.

Néanmoins, il faut en effet, distinguer entre l'avancement des réactions d'hydratation du ciment (phénomène d'ordre chimique), et le développement de résistances (phénomène d'ordre physique). Ce dernier dépend évidemment de la qualité d'hydrates fournis par l'hydratation, mais aussi de la façon dont ces hydrates s'assemblent, de leur arrangement dans l'espace et de leurs liaisons.

- Influence des fillers calcaires sur la durabilité

La durabilité des bétons peut être reliée en grande partie à la pénétration d'agents nocifs (CO_2, chlorure…). L'étude de la perméabilité des bétons contenant des fillers calcaires est donc un point essentiel si l'on veut étudier leur comportement à long terme. Pour les essais de perméabilité, que ce soit au gaz ou à l'eau, les résultats semblent contradictoires suivant les études réalisées. Les résultats trouvés pour la perméabilité et la sportivité à l'eau varient suivant les recherches effectuées. En effet, Tsivilis et al. **[103,104]** montrent que l'ajout de filler n'influe pas sur ces deux caractéristiques alors que Zhu et al. **[71]** trouvent des valeurs légèrement inférieures pour les bétons avec calcaire.

Une étude de l'incidence du calcaire finement broyé sur la durabilité des bétons conservés dans l'eau de mer **[105]** affirme que la masse volumique du béton aux fines calcaires est plus élevée que celle du béton de référence. Il est ainsi confirmé que la surface spécifique élevée du calcaire favorise l'accroissement de la compacité de la matrice cimentaire. Cet effet permettrait une réduction de la porosité capillaire (et donc de la perméabilité) et par conséquent une augmentation des résistances chimiques envers le milieu agressif (l'eau de mer).

Il faut, pour pouvoir interpréter ces résultats, tenir compte du fait que les essais de perméabilité sont fortement dépendants du prétraitement (température, durée de séchage) applique aux échantillons.

I.2.2.2 laitiers de haut fourneau

Le laitier granulé de haut-fourneau est un sous-produit des usines sidérurgiques formé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une fois sorti du four, il subira un refroidissement rapide qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment ; Selon la norme européenne ENV 197-1 **[106]**, Le laitier de haut-fourneau est un matériau hydraulique latent, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il a subi une activation convenable.

- Influence de laitier de haut fourneau sur le béton frais

Il est bien prouvé que l'ouvrabilité des bétons au laitier est bien améliorée comparée à celle des bétons sans laitier. Selon boukendakdji **[17]** la teneur en laitier a un effet direct sur la demande en eau du mélange où le rapport E/C diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier ce qui est expliqué par les surfaces vitreuses lisses à faible taux d'absorption des grains du laitier ce qui permet le glissement intergranulaire dans le mortier et par conséquent une faible demande en eau et une meilleure cohésion. Ce qui les rend bénéfiques pour la formulation des bétons autoplaçant, puisqu'ils permettent de baisser la viscosité et augmente la plasticité de la pâte par la diminution de la quantité de clinker réactive au jeune âge et réduction d'éttringite formé.

Plusieurs recherche **[17, 107]** montrent que 15% du laitier est optimal du point de vue ouvrabilité, écoulement, la capacité de remplissage et de passage et la résistance à la ségrégation. D'après EUGC **[67]** une proportion de 5 à 15% de l'échantillon passant à travers le tamis donne une résistance optimale à la ségrégation.

A des températures normales, la présence de laitier dans le béton conduit à un retard de prise, habituellement de l'ordre de 30 à 60 minutes **[108]**. Brooks et al. **[109]** trouvent que l'inclusion des ajouts minéraux et spécialement le laitier à 40% et plus retarde le temps de prise.

Paine et al. **[110]** ont montré que la chaleur d'hydratation augmente avec l'augmentation de la finesse du laitier et qu'elle diminue avec l'augmentation du pourcentage de laitier présent dans le mélange. La faible chaleur d'hydratation des ciments au laitier montre que ces derniers peuvent être utilisés dans des structures à grandes masses de béton tel que les murs de soutènement.

- Influence de laitier de haut fourneau sur les propriétés mécaniques

Amrane et al. **[111]** ont introduit le laitier, par substitution, jusqu'à 50%. Ils ont observé une diminution de la résistance jusqu'à 28 jours, pour tous les pourcentages de substitution, mais à 90 jours, et pour 15% de substitution du ciment par du laitier, ils ont enregistré une résistance nettement supérieure à celle du béton de référence, ce qui est confirmé par boukendakdji **[17]** et Behim et al.**[112]**. Selon Venuat **[113]**, les bétons avec le laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours. Ces bétons commencent à se rattraper au bout de sept jours à 20°C.

Bougara et al. **[114]** ont expliqué les propriétés mécaniques faibles, à jeune âge, du béton à base de laitier par la lente réactivité du laitier qui commencent à se rattraper pour donner des résistances plus élevées à long terme, grâce à la réaction pouzzolanique avec la chaux fournis par le clinker lors de l'hydratation du ciment. Cette réaction pouzzolanique permet de créer les silicates de calcium hydraté CSH d'une part et réduire la taille des pores capillaires d'autre part **[70]**. Ils ont aussi trouvé que la résistance à la compression à long terme augmente avec l'augmentation de la finesse du laitier. Enfin ils concluent qu'en augmentant la température de cure, la résistance à jeune âge augmente et la résistance à long terme diminue, par contre Hammat **[78]** a remarqué que les résistances des mortiers contenant 15% et 30% de laitier sont comparables à celle du mortier de référence.

tout comme les résistances à la compression, Boukendakdji **[17]** a trouvé que les résistances à la traction diminuent avec l'augmentation de la teneur en laitier cette diminution est moins importante à 90 jours d'âge, en comparant les résistances à la traction pour les deux teneurs en laitier, 0 et 15%, on remarque que la différence à 28 jours était de 0,84 MPa, pour diminuer à 0,49 à 90 jours, soit une diminution de 42%. On ajoutera en fin qu'à 28 jours, la diminution de la résistance à la traction est moins importante que celle de la résistance à la compression et ce pour tous les taux de substitution du ciment par du laitier, contrairement Felekoglu et al. **[66]** ont montré que les mélanges de BAP présentent des résistances à la traction élevée comparées à celles des bétons traditionnels

- Influence de laitier de haut fourneau sur la durabilité

Le mélange de ciment et de laitier qui, contenant plus de silice et moins de chaux que le ciment Portland seul, produit plus de C-H-S. La microstructure résultante de la pâte de ciment hydraté est dense, ce qui permet d'améliorer la résistance à long terme et particulièrement la durabilité. En effet d'une part le risque de réaction alcali-silice peut être éliminé

indépendamment de la teneur en alcali du ciment portland ou de la réactivité des granulats **[108]**. D'autre part, l'attaque des sulfates est réduite ; les ciments contenant 40% ou plus de laitier ont généralement une bonne résistance aux sulfates et en particulier si la teneur en C_3A et faible **[115]**.

Nehdi et al. **[116]** confirment que l'introduction d'ajouts minéraux en grande quantité, améliore la durabilité des BAP. Ainsi, pour des mélanges binaires, ternaires et même quaternaires, donne de grandes résistances à long terme, bonne résistance au gel dégel, faible expansion au sulfate et une très faible perméabilité aux ions chlore.

Al-Otaibi **[117]** après avoir remplacé le ciment par 60% de laitier, trouve que la porosité a augmenté pour le même rapport eau/ciment, par contre la porosité a diminué pour une ouvrabilité constante

I.2.2.2 La pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer **[179]**. Actuellement en Algérie, le gisement de BOUHAMIDI, situé à 2.5 km de Beni-Saf, demeure l'unique gisement exploité. La production est estimée de 1000 à 1400 tonne/jour. La quasi-totalité de cette quantité est destinée aux cimenteries de l'Est et de L'ouest du pays **[179]**, Plusieurs pays comme la Chine, la Grèce, l'Italie, l'inde et le Mexique, utilisent encore des millions de tonnes de pouzzolanes naturelles pour fabriquer des ciments Pour des raisons d'épargne d'énergie ou il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus.

Ces matériaux bien que n'ayant pas des propriétés hydrauliques, ils peuvent les acquérir par fixation de la chaux libre ou de celle issue des réactions d'hydratations du clinker du ciment. En effet, la pouzzolane naturelle, étant un ajout pouzzolanique, sa présence dans un system clinker gypse produit des réactions chimiques qui commencent dès l'addition de l'eau. La solution en premiers temps est hautement saturée en Ca^{+2} et OH^- et très riche en SO_4^{-2} selon le type du ciment. Les premiers produits qui se forment sont l'ettringite et la portlandite. Suite à cela, la réaction pouzzolanique peut commencer avec la formation de fines particules de CSH. Cette réaction est lente par rapport aux réactions d'hydratation du ciment Portland.

Une foi les propriétés hydrauliques sont acquises, la pouzzolane naturelle peut présenter des avantages très intéressants tant à l'état frais qu'à l'état durci du béton ainsi qu'une amélioration de la durabilité.

- Influence de la pouzzolane sur le béton frais

L'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-saf sur les propriétés des pâtes de ciments à l'état frais a été étudié par AICHOUBE et al. **[118]**. Il a été montré que la substitution du ciment par la pouzzolane de 10% à 30% engendre une augmentation de la consistance normale (diminution de l'ouvrabilité) et une diminution du temps de prise de la pâte de ciment. En effet, il a été montré que l'addition de la pouzzolane naturelle en grandes quantités engendre une accélération de la prise de la pâte de ciment générée par une importante consommation d'eau par l'hydratation. COLAK **[120]** a également montré qu'à maniabilité constante, le besoin en eau des pâtes de ciment Portland augmente lorsque le ciment est substitué par la pouzzolane naturelle. Hammat **[78]** et Allali **[121]**ont confirmé cette réduction d'ouvrabilité traduite par une réduction du diamètre de la galette du béton qui est décrit par l'essai d'étalement. Diamantonis et al. **[122]**, ont aussi observé que la substitution du ciment portland par la PZN (20% à 40%) augmente la valeur de seuil d'écoulement des BAP d'une manière significative.

D'après Turanli et al. **[123]**, cette augmentation de la demande en eau est interprétée par la nature microporeuse et la forme angulaire des particules de la PZN. La forme arrondis des particules de la PZN avec des surfaces rugueuses donne une capacité d'absorption plus importante d'eau dans les pâtes de ciment. En plus, l'existence de la minérale zéolite fait incorporer les molécules d'eau dans leur structure poreuse interne.

La viscosité plastique est proportionnelle aux temps d'écoulement T50 au cône d'Abrams et TV-F de l'entonnoir en V (V-Funnel), Selon Allali **[121]** la valeur du temps TV-Funnel augmente légèrement avec l'augmentation de dosage de la PZN pour le cas de la finesse 3500 cm_2/g. L'auteur a conclu également que le taux de substitution de 15% du ciment par la PZN correspond au dosage optimal pour que le béton reste toujours autoplaçant et avoir une bonne stabilité vis-à-vis à la ségrégation statique.

- Influence de la pouzzolane sur les propriétés mécaniques

BENKADDOUR et al. **[124]** dans leur étude ont trouvé que la résistance en compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane à jeune et à moyen âge (2, 7 et 28 jours). A titre d'exemple, ils ont remarqué qu'une substitution de 30% de pouzzolane naturelle engendre une diminution de la résistance en compression de 36,7% ; 6,2% et 24,5% à 2, 7 et 28 jours respectivement.

D'autre part, Benkaddour **[124]** a montré qu'un taux de substitution de 30% de pouzzolane engendre une diminution de 15% de la résistance à la compression des bétons à long terme (90 jours). Ces résultats sont similaires avec ceux obtenus par Aichoub et al. **[118]** qui ont trouvé une diminution de 11% de la résistance à la compression à l'échéance de 90 jours. Cependant, il a été affirmé par autre chercheur que l'utilisation de la pouzzolane naturelle entraine un accroissement de la résistance des bétons à long terme **[126]**,et une augmentation des résistances mécaniques (compression et flexion) ainsi qu'une cinétique d'hydratation accélérée pendant la période de durcissement initial (à court terme). Ceci est dû à la finesse de la pouzzolane et au pourcentage d'hydroxyde de calcium dans les différents mélanges ciment et pouzzolane, qui accélère le processus d'hydratation, en assurant une prise rapide, ce qui réduit les temps de prise des différents mélanges **[127]**.

L'écart de résistance qui est plus au moins important à court terme (3 et 7 jours) est peut-être dû à l'activité pouzzolanique de la pouzzolane naturelle qui est lente à cet âge de conservation. Ce phénomène s'explique par la réaction en présence d'eau de la silice amorphe (SiO_2) présente dans la pouzzolane naturelle avec la portlandite $Ca(OH)_2$ produite par l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) supplémentaires. Par ailleurs, l'amélioration des résistances en compression à 28 et 56 jours peut être attribuée à l'augmentation des hydrates (C-S-H) grâce à 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.

- Influence de la pouzzolane sur la durabilité

Les romains utilisaient déjà la pouzzolane dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles. Nombreux chercheurs ont affirmé que cette durabilité est due à l'incorporation de la pouzzolane qui améliore la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment ce qui réduit la

porosité qui en découle pour toute la matrice cimentaire se traduit par une réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité ainsi une protection des armatures contre la corrosion et une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces **[127]**.

La réaction pouzzolanique conduit à une réduction de la chaux libre dans la pâte de ciment et donc réduire le risque d'attaque des sulfates. La figure I.10 illustre bien la diminution de l'expansion des mortiers contenants 10%, 30% et 40% de la pouzzolane naturelle et conservés dans solution contenant 1% de Mg SO_4 pendant 5 ans **[128]**.

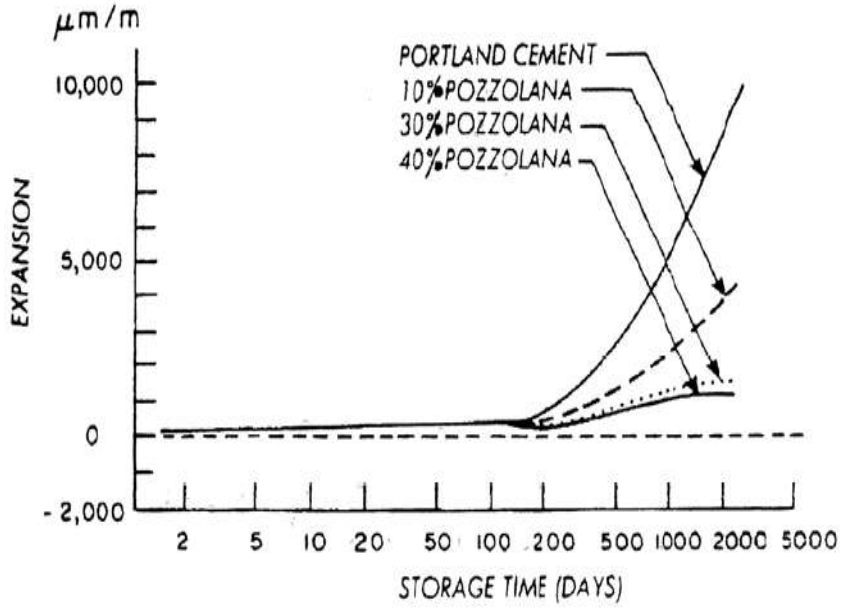


Figure I.10. Effet de la pouzzolane sur l'expansion des mortiers immergés dans une solution à 1% de sulfate de magnésium **[128]**.

I.3Effet de la température de cure sur les caractéristiques des bétons autoplaçants.

I.3.1Effet de la température sur les propriétés mécaniques

I.3.1.1Résistances mécaniques

Un béton qui durci sous une température élevée se caractérise par une accélération de sa hydratation au jeune âge donnant lieu à des résistances élevées pour tous les types de bétons , vibré, autoplaçant ou de haute performance, avec ou sans ajout, Cet effet bénéfique n'est liée à aucune grandeur que la température, plus elle est élevée, plus la vitesse d'hydratation est rapide plus la résistance au jeune âge est élevée aussi **[129-140]**; cette augmentation ne dure

pas pour tous les types de bétons, les résultats des recherches se diffère entre une diminution, stabilisation et même une augmentation de la résistance et cela fonction du type de béton, type et le taux d'additions et l'humidité de cure.

Plusieurs chercheurs ont prouvé une diminution de la résistance soit à 7, 28jours ou à long terme. Au fait, ils y'a plusieurs explications de la chute des résistances, Pour certain elle est prévisible en raison de la perte d'humidité dans les pores capillaires par évaporation d'eau due à l'augmentation de la température où l'hydratation dissipée peut entrainer une réduction d'hydratation après les trois premier jours **[141,142]**.

D'autre explique cette diminution qu'au départ la réaction d'hydratation est thermoactive et le degré d'hydratation évolue rapidement, Ensuite parce que les hydrates formés lorsque la température augmente sont plus faibles mécaniquement et leur distribution est non uniforme, la résistance à long terme devient plus faible **[143-145]**.

Le précipite plus dense déposé à une température élevée peut former une barrière à la diffusion des ions, ce qui provoque un manque d'homogénéité dans la microstructure et une résistance considérablement réduite **[146]**.

D'autres parts Dent et al. **[147]** ont trouvé qu'une augmentation de la température n'entraîne pas de modifications significatives de la nature des hydrates formées (pour une température inférieure à 80°C environ), mais surtout une modification de leur arrangement, À un âge plus avancé, le nombre important des hydrates formés n'ont pas le temps d'organiser convenablement, et cela engendre une perte de résistance. **[148, 149]**.

Certain solution sont proposé pour éviter cet effet néfaste de l'augmentation de la température.

Pour limiter l'effet de l'augmentation importante de l'évaporation de l'eau, il faut augmenter le dosage en eau pour conserver au béton la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation, mais cela mène aussi à une forte porosité, une autre solution est de prévoir une cure humide.

les troubles provoqués par l'augmentation de température peuvent être minimisé par l'utilisation des additions minérales tels que la pouzzolane naturelle, de cendres volantes ou de laitier granulé de haut fourneau, en fonction de ces caractéristiques et leurs taux de remplacement, Ils donnent au béton une performance remarquable dans les climats chauds où l'effet négatif de la température est réduit, ces additions peuvent modifier la cinétique

d'hydratation, réduire le dégagement de chaleur et produire des hydrates CSH supplémentaires **[150]**.

L'effet bénéfique des additions dans des températures élevé est indiqué par plusieurs chercheurs. En effet, Pratas **[151]** a effectué un essai avec deux mélanges, un avec CPA et l'autre avec un remplacement de 50% du ciment par des laitiers. Les échantillons ont été maintenus dans l'eau aux températures de 5°C, 20°C et 30°c juste après démoulage ; ceci a montré que la résistance des laitiers est plus affectée par la température de 5°c que celle du ciment Portland mais à une température de 30°c la tendance a été renversée (figureI.11).

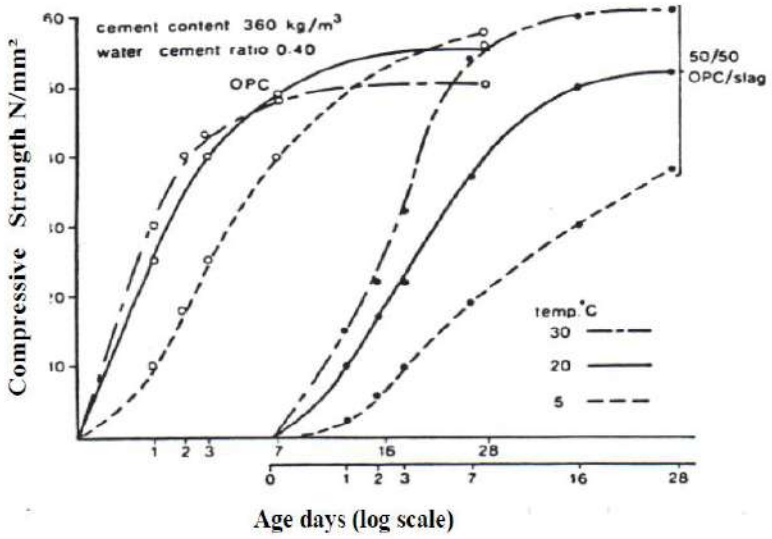


Figure I.11. Effet de la température de cure humide sur la résistance à la compression **[151]**.

Selon les résultats obtenues, l'augmentation de température a un effet positive sur la résistance des ciments avec 50% de laitier pour tous les âges mais pour les ciments sans additions il y'as une chute de résistances âpres le septième jour.

Neville **[152]** a précisé que le béton qui est soumis à la haute température affectera la structure de la pâte qui implique la formation de produits avec la structure ouverte, mais ce fait est empêché par la présence des additions.

Videla et al. **[153]** ont étudié le comportement de ciment Portland et de ciment avec additions à diverses températures de durcissement (5, 20 et 30 °C) ont observé que la résistance du ciment mélangé montre des courbes croissantes avec l'augmentation de la température. Mirza et al. **[146]** a révélé que les mortiers avec additions pouzzolaniques tels que la poudre de tuf, le laitier et les fumées de silice permet d'améliorer les performances des mortiers et la

résistance du béton à l'exposition à une température plus élevée que la normale, en particulier dans la plage de 35 à 50°C

Turkel et al. **[201]** ont rapporté que les ciments composites fonctionnent bien sous traitement thermique.

Les résultats des essais effectués par Wainwright et al. **[154]** dans lequel le béton est soumis à l'élévation adiabatique de la température sont montrés dans la figue I.12. Dans cet essai, 0% ,50% et 70% de laitiers ont été utilisés avec un rapport E/C de 0.41 ; les chiffres montrent clairement que, tous les bétons dans la condition cyclique ont montré des résistances à jeune âge supérieures que celles du béton dans les conditions ordinaires. À partir du septième jour l'élévation de la température mène à une diminution des résistances des bétons sans additions, mais avec l'incorporation de laitier les bétons gardent des résistances similaires à celles des bétons dans les conditions ordinaires.

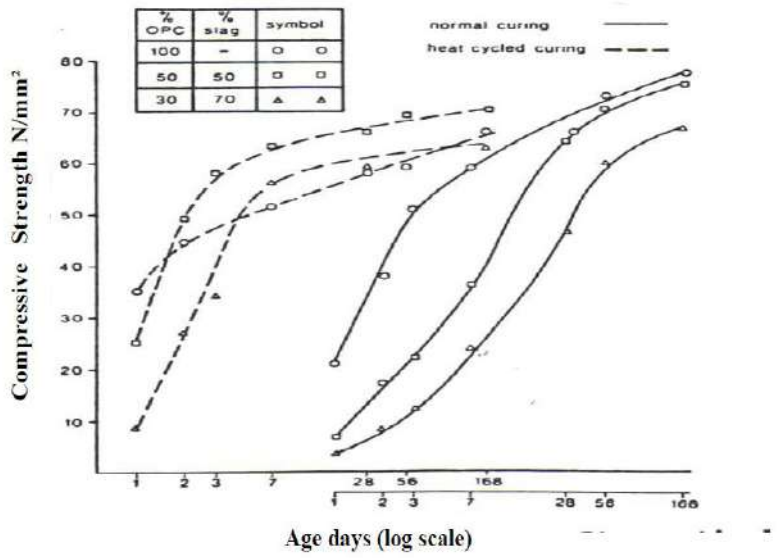


Figure I.12. Résistances de compression des bétons avec et sans laitier à différentes conditions de cure **[154]**.

Kanstad et al. **[155]** rapportent que l'incorporation d'addition minérale telle que la fumée de silice ou la cendre volante permet de maintenir la résistance lorsque la température de mûrissement augmente de 20°C à 55°C dans des bétons de haute performance (70 à 80 MPa). Les auteurs ne donnent pas d'explication à cette observation. Sur des niveaux de résistance plus faibles, Kim et al. **[156]** montrent également que l'emploi d'un liant ternaire (ciment type

V ASTM (ajout non précisé) + cendre volante) maintien ou améliore les résistances à 28 jours entre 23°C et 50°C (maintien des conditions de cure jusqu'à 28 jours).

L'effet de température élevée est aussi varié selon le type de béton, vibré, autoplaçant ou de haute performance**.** Dans des travaux sur l'effet d'une température élevée (conditions de temps chaud) à la confection (20et 50°C) et au mûrissement (20 et 35°C) sur un certain nombre de propriétés du BAP (BAP1 avec 50% fillers ; BAP 2 avec 25% Fillers et BAP 3 avec Fillers+Laitier)**[157]**, L'auteur a trouvé que l'élévation de la température initiale du béton de 20°C à 50°C favorise les résistances mécaniques à la compression à toutes les échéances étudiées (1j, 7j et 28j) pour BAP1 et BAP2. C'est un fait qui, dans le même contexte expérimental, n'était pas visible sur éprouvettes de bétons traditionnels vibrés.

Des travaux menés par Tan et Gjorv **[158]** ont montré que l'effet de la température de murissement sur la résistance à la compression exprime en pourcentage de diminution, est plus petit dans le cas de BHP que dans le cas du béton usuel. Les résultats montrent que la résistance à la compression à 28 jours diminue de 11 %, 15 % et 23 % lorsque la température augmente de 20 à 50, 65 et 80 °C respectivement pour le béton usuel. Tandis que, elle est de 2 %, 6 % et 7 % dans le cas de béton léger à haute performance. Les auteurs relient cela, au fait que, les grains de ciment sont tellement proches de façon que la quantité des hydrates formes dans la période initiale de murissement, sera suffisante pour remplir tous les espaces intergranulaires. Par conséquent, la diminution du taux d'hydratation dans la période qui suit, cause par l'augmentation de la température de murissement, n'affecte pas la résistance à long terme.

La limitation des effets négatifs de l'augmentation de la température peut être assurée par la limitation de la température à 40°C.Monzo et al. **[159]** ont variés la température de cure des ciments mélangé avec des cendre volante entre 20 et 80°C; ils ont constaté que 40° C est une température optimale pour le développement de la réaction pouzzolanique dans les conditions expérimentales étudiées.

D'autres enquêtes faites par Escalante et al. **[148]** ont conclu que 30°C est la température optimale pour le développement de la résistance dans les mortiers avec laitier.

Après une étude d'influence de la température sur le développement microstructural des bétons par Gallucci E. **[160]**, il a conclue qu'à basse température, après un jour d'hydratation, la réaction d'hydratation est moins avancée qu'à haute température : il n'y a pas encore

d'inner C-S-H et le 'gap' caractéristique entre les grains anhydres et la première coquille d'hydratation est observé. A température plus élevée, on observe du inner C-S-H et pour le béton à 60°C, de nombreux de Hadley (petits grains totalement hydratés) sont observés. A 40°C, la matrice cimentaire semble remplie de manière plus homogène qu'à 60 °C.

I.3.1.2Module d'Elasticité (E)

Les recherches sur l'effet de la température sur le module d'élasticité ne sont pas nombreuses et aucune justification sur cet effet n'est présentée.

Zevcovic **[161]** dans ces recherches sur l'effet de l'augmentation de la température sur l'état frais et durcis des bétons, a trouvé que les valeurs du module d'élasticité les plus élevées, sont celles à 8°C et les plus basses sont celles à 60°C. L'influence de la température sur le module d'élasticité est qualitativement la même que sur la résistance à la compression, mais la différence quantitative est considérable. Les valeurs de E à 8°C et à 60°C défèrent seulement de 17% alors que celles de la résistance, sous ces mêmes températures, défèrent de 40%.

Boukni**[162]** dans ses travaux a trouvé que, les modules d'élasticité des éprouvettes conservées à 20°C sont toujours supérieurs à ceux des éprouvettes recevant un étuvage, et ceci quel que soit la température du mûrissement.

Aggoun et al. **[163]** rapportent que la variation de la composition du BAP, l'étuvage et son mode d'application n'ont pas d'effets importants sur la tendance générale de la relation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité.

I.3.1.3La vitesse de propagation des ondes

Peu de recherches qui sont faites sur l'effet de la température de cure sur la vitesse de propagation des ondes ultrasonores des bétons autoplaçants.

Pour les bétons ordinaires, Abbasi **[164]** a signalé une diminution de la vitesse avec l'augmentation de la température, et cela indique l'effet nuisible de la cure chaude sur la qualité de ces bétons.

Gesoğlu **[165]** a montré qu'à 1 jour, les bétons traités thermiquement avaient des valeurs de vitesses de propagation des ondes (VPO) légèrement supérieures au béton durci dans les conditions normales. Et à partir de 7 jours il n'y avait aucune différence remarquable dans les valeurs VPO des bétons.

I.3.2Effet de la température de cure sur la durabilité

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le béton. Cette propriété est définie par la capacité du matériau à maintenir ces caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de service existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité **[166]**. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée.

L'élévation de la température du béton entraîne un certain nombre de transformations physico-chimiques et microstructurales qui vont alors conduire à un changement des propriétés mécaniques et de transfert **[167]**.

I.3.2.1Porosité d'absorption

Les transformations physico-chimiques, dont la décomposition du gel C-S-H, et la fissuration thermique due à l'incompatibilité des déformations thermiques, modifient la géométrie de la structure poreuse du béton. Le départ de l'eau, sans modifier la porosité totale, augmente le volume de pores accessibles à la phase gazeuse par rapport à la phase liquide. Cependant, la fissuration thermique, accompagnée d'un élargissement des pores, participe à l'augmentation de la porosité totale. Par ailleurs, avec l'augmentation de la porosité, la résistance mécanique diminue **[168]**.

Suite aux recherches élaborées par Gallucci **[160]** dans le but d'étudier l'influence de la température sur le développement microstructural des bétons et par mesure de la porosité capillaire par analyse d'image, il a été constaté que sur le long terme, la cure en température élève a pour effet de générer un réseau poreux plus large. On distingue deux périodes : à très jeune âge, plus la température est basse, plus la porosité est élevée. Ceci est lié aux faibles taux d'hydratation mesurés. Très rapidement, on observe une inversion des tendances avec des porosités plus fortes à haute température voir figure I.13.

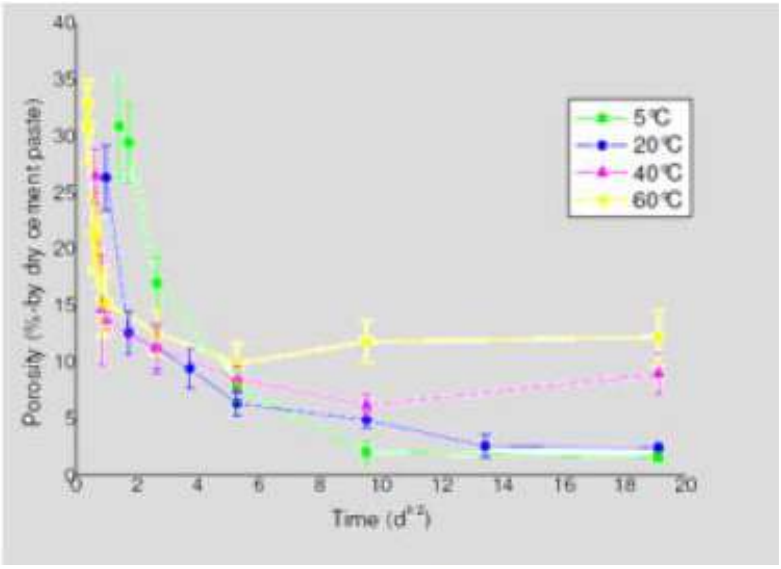


Figure I.13. Evolution de la porosité d'un béton sous l'effet de la température **[160]**.

Vu ce qui précède, on peut conclure que l'élévation de la température engendre une hydratation plus rapide mais qui favorise le développement d'un réseau poreux plus grossie.

Le tableau I.4, montre une comparaison entre un CPA et un ciment contenant 15% de cendres volantes dans des différentes températures **[169]**. La distribution des dimensions des pores montre que le volume des pores capillaires diminue en augmentant la durée de cure, et montre une augmentation dans les pores fins. Dans un mortier aux cendres conservé à 40°C, la porosité totale réduit de 22% à trois jours et de 14.75% à 90 jours, et son diamètre moyen réduit de 0.057 microns à 0.031.

Tableau I.4. Effet de la température sur la porosité totale et les dimensions des pores dans un ciment contenant 15% de cendre volante **[169]**.

Ciment	**Age**	**Porosité totale (%)**		**Diamètre moyen de pores (micron)**	
		40°C	20°C	40°C	20°C
CPA	3J	23.14	20.77	0.0707	0.0601
	90J	17.31	15.56	0.0804	0.0308
CPJ	3J	24.03	21.90	0.0567	0.0570
	90J	16.73	14.75	0.0508	0.0310

Selon plusieurs recherches les pâtes de ciment avec ajouts sont fortement affectées par le climat chaud point de vue durabilité. Mais elles ont de bonne durabilité quand elles sont conservées humide.

Haque et Kayyali**[170]** ont rapporté que la porosité totale des ciments portlands et le ciment aux cendres diminue avec le temps dans les conditions de cure humide. La porosité totale de ciment à la cendre était toutefois celle de ciment portland. Cette valeur élevée de la porosité total de ciment au cendre est plutôt intenable, parce que la seconde réaction pouzzolanique est connu d'ajouter le processus de remplissage de pores et les raffiner.

Austin et Robins **[171]** ont rapporté que les résultats d'absorption d'eau et de perméabilité indique qu'en climat chaud, les ciments au laitier sont moins perméables que les CPA quand ils sont conservé humide. Mais sans cure la perméabilité va dépasser celle de CPA.

Smith **[172]** a montré que les bétons durcis contenant entre 5% et 12.5% de fumé de silice vont réduire la perméabilité, donc les bétons en fumé de silice sont plus durables mais les grandes doses sont déconseillées.

Les résultats des recherches de Derabla **[173]** sur l'effet du traitement thermique sur la porosité et l'absorption d'eau des BAP sans et avec additions ont prouvés que ce traitement thermique n'as pas une influence sur la porosité des BAP sans additions et même une faible augmentation de la porosité pour les BAP avec 20% de calcaires, par contre l'incorporation de 20% de laitier a engendré une augmentation de 37% jusqu'à une valeur très proche à celle des deux autres bétons ; Les valeurs de l'absorption d'eau sont plus faibles que celles du la porosité, car la porosité c'est le volume total des pores existant et l'absorption est liée à l'interconnexion entre ces pores, Toujours selon Derabla **[173]** le traitement thermique a la même influence sur l'absorption d'eau que la porosité pour les trois types de bétons étudiés.

I.3.2.2 Effet de la température sur le transport d'eau

Nombreux travaux ont étudiés le transport d'eau dans les milieux à hautes températures, ils ont montrés une accélération du séchage en température et une augmentation des propriétés de transferts avec la température **[174]**. Soulignons les travaux de brue **[175]**. La cinétique de désaturation à 20,50 et 80°C d'un béton à base de CEM V est tracée à partir du suivi des pertes de masses (figuresI.14). Il apparait que pour une HR donnée, l'équilibre hydrique est atteint beaucoup plus rapidement à 80°C qu'à 50°C puis 20°C. Par exemple à 60%HR, plus de 200 jours sont nécessaires pour que l'équilibre hydrique soit atteint à 20°C, contre moins

de 100 jours à80°C. Poyet **[176]** a varié de températures de 30 à 80°C, il a trouvé que 90% de la perte de masse total est atteinte a un mois pour 80°C contre 1 ans à 30°C.

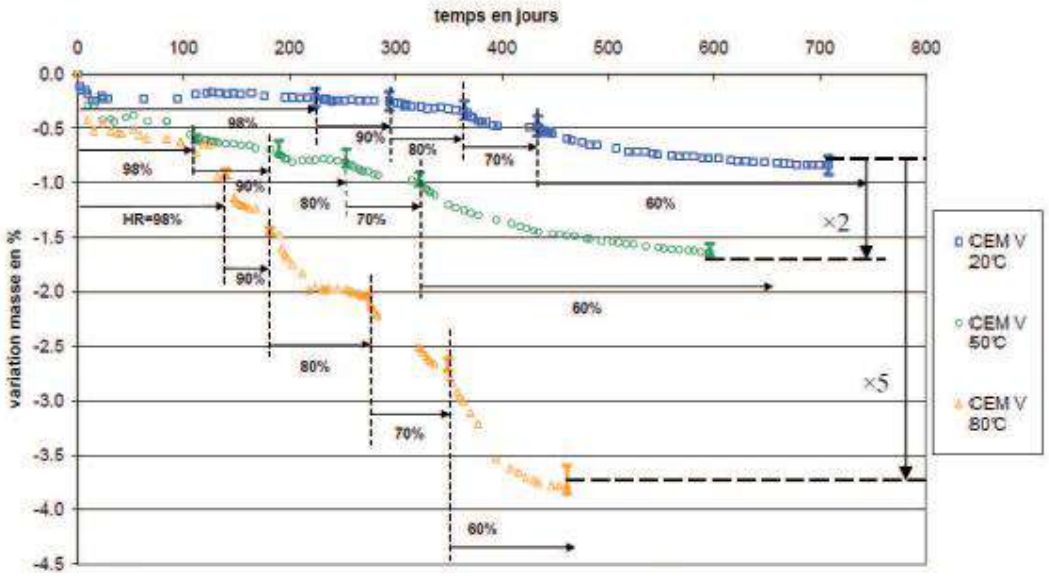


Figure I.14. Cinétique de désaturation d'un béton à base de CEMV pour trois températures (20,50 et 80°C) **[175]**.

I.3.2.3 Perméabilité aux ions chlores

La pénétration des ions chlores est le résultat d'un grand nombre de processus dans un milieu saturé, le transfert est gouverné par la diffusion des ions sous gradient de concentration et leur fixation par les hydrates de la pâte de ciment. Les chlorures en solution sont d'abord entraînés dans les pores en même temps que l'eau absorbée, par la suite la diffusion s'effectue par la pénétration des chlorures, Une partie des ions peuvent être "piégés" dans la pâte de ciment. Il existe deux mécanismes de captage des ions:

- Adsorption sur les surfaces internes des hydrates ou des pores;
- Interactions chimiques avec les aluminates pour former des chloroaluminates de calcium (sel de Friedel - $C_3A.CaCl_2.10H_2O$) qui sont relativement peu dommageables.

La pénétration des chlorures dans le béton est favorisée par la température élevée du milieu de conservation. Néanmoins, ce phénomène est moins intense en présence de l'humidité, ainsi la structure des pores du béton est réduite à tout âge et par conséquence la réduction de la perméabilité au chlorures. La cure initiale diminue l'effet de la pénétration des chlorures d'une façon significative à jeune âge **[177]**.

Des essais d'immersion dans des pâtes de ciment Portland et de ciment Portland avec 35 % de pouzzolanes de Salone ont été réalisés. Les pâtes (E/C = 0,40) ont été soumises à une cure à 25° C dans du sable humide pendant 2 mois, puis un mois supplémentaire dans l'air avant d'être mises en solution de $CaCl_2$ de 30 g/kg d'eau. Les températures d'essais préconisées sont 10, 25 et 40°C. Pour les deux pâtes de ciment Portland et de ciment Portland avec ajouts (TableauI.5) **[167]**.

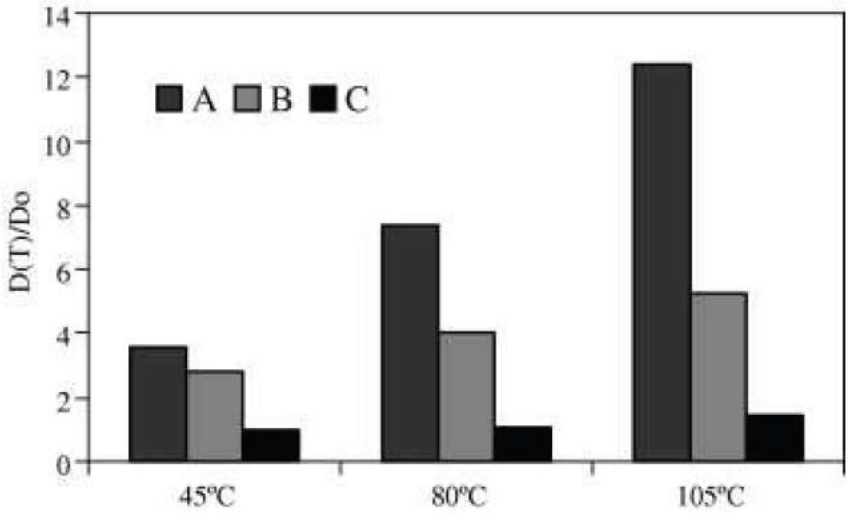
Tableau I.5. Coefficient de diffusion apparent des pates **[167]**.

Température (°C)	D_{app} ciment Portland (10^{-12} m^2/s)	D_{app} ciment pouzzolanique (10^{-12} m^2/s)
10	1,23	0,83
25	2,51	0,90
40	4,85	0,97

Selon ces résultats il a été constaté que le coefficient de diffusion des chlorures augmente avec la température et l'utilisation des ciments pouzzolanique permet une meilleure résistance à l'agression des chlorures du fait d'un coefficient de diffusion de l'ordre de dix fois plus faible que celui des ciments portland.

Ces résultats sont complétés par ceux de Caré **[178]**, qui a mesuré le coefficient de diffusion apparenta différente températures par rapport au coefficient de diffusion apparent à 20°C(D_0) des pâtes de ciment avec E/C différent (pate de ciment A (E/C=0,35), pate de ciment B (E/C= 0,45), pates de ciment C (E/C=0,6) (figure I.15).

Plus la température du traitement thermique est élevée, plus le coefficient de diffusion relatif à l'état sec est important. Ceci traduit l'apparition de microfissures induites par le traitement thermique, qui conduisent à l'augmentation des chemins de diffusion. Plus la température est importante, plus la microfissuration est développée, et ce quel que soit le rapport E/C considéré.



FigureI.15. Evolution du coefficient de diffusion apparent relatif à l'état sec de trois pâtes de ciment en fonction de la température **[178]**.

I.4Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives aux caractéristiques des bétons autoplaçant à l'état frais et durci ainsi que l'effet des additions minérales et la cure à des températures élevés sur ces propriétés.

Ce béton extrêmement fluide présente plusieurs avantages qui font de lui une révolution très importante dans le monde de la construction et celui du génie civil pondant les deux dernières décennies. Ses avantages sont définis du point de vue rhéologique, par un seuil de cisaillement assez faible permettant une facilité de mise en œuvre sans vibration et une viscosité suffisante pour maintenir un niveau de stabilité et d'homogénéité correct.

La formulation des BAP est relativement complexe et nécessite de trouver un bon compromis pour assurer la capacité au remplissage et au passage, la résistance à la ségrégation et la stabilité qui sont les caractéristiques qui définissent l'autoplaçance de ces bétons. Par conséquence de ses spécifications de formulation qui nécessite un faible rapport Eau/poudre et un volume de fines élève, les BAP possèdent des résistances relativement élevées et une durabilité améliorée par rapport aux bétons usuels.

Comme les BAP contiennent une forte teneur en fines, par souci technique, économique et écologique, on a souvent recours à des additions minérales, qui peuvent être moins réactives que le clinker, mais à faible coût. C'est dans cette optique que la première partie de notre travail de recherche a été orienté, Plusieurs travaux dans la littérature ont montré que l'incorporation des éléments d'additions a des effets bénéfiques sur les propriétés des BAP tant à l'état frais, qu'à l'état durci (résistance et durabilité).

La cure est parmi les facteurs les plus importants qui peuvent influé la qualité finale des BAP, une augmentation de la température de cure mène à une accélération d'hydratation à jeune âge, ce qui fait l'unanimité des auteurs, mais avec une diversité quantitative, à long terme les effets de cette augmentation sont différents selon le type d'addition utilisé et la valeur de température.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux d'étude et à l'exposé des méthodes expérimentales que nous avons utilisées pour faire aboutir notre travail.

CHAPITRE 2

MATERIAUX ET ESSAIS

II.1. Introduction

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 additions minérales (pouzzolane naturelle, laitier et calcaire), les granulats (sable et gravier), l'adjuvant et l'eau de gâchage. Dans une seconde partie, nous décrivons la méthode de formulation adoptée et nous présenterons par la suite les différents essais réalisés au cours de notre étude.

II.2. Caractérisation des matériaux utilisés

Afin de pouvoir utiliser les additions dans les différentes formulations du béton autoplaçant (BAP), nous avons procédé à leur étuvage à 50C° jusqu'à obtenir une masse constante et ceci dans le but de faciliter leur broyage. Les additions ont été ensuite broyées à une finesse comparable à celle du ciment (3500 cm^2/g). Pour le broyage du laitier et pouzzolane naturelle, nous avons utilisé un broyeur à boulets du laboratoire de chimie industrielle à l'Université Saad Dahleb de Blida (figure II.1). Le broyage du calcaire a été réalisé avec un broyeur à disque au niveau du Hall de Technologie de l'Université Dr YAHIA Farés de Médéa (figure II.2).



Figure II.1.Broyeur à boulets



Figure II.2. Broyeur à disque

II.2.1. Ciment

Le ciment utilisé pour la préparation des différents mélanges est un ciment portland artificiel CPA CEMI 42,5 provient de la cimenterie d'Ain El Kebira (SETIF). Ce ciment de couleur grise est obtenu en mélangeant le clinker avec une proportion du gypse. L'analyse de l'influence des additions minérales sur les performances des bétons autoplaçants a imposé le choix de ce type de ciment sans ajouts, La composition chimique et la composition minéralogique obtenue en utilisant les formules de bogue sont présentées dans le tableauII.1.

Tableau II.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CPA CEM I 42,5.

Composition chimique (%)									
CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	PAF	RI
63,47	20,14	3,71	4,74	2,12	2,67	0,69	0,47	1,72	0,27
Composition minéralogique (%)									
C_3S		C_2S		C_3A		C_4AF			
57,3		25,5		6,6		10,6			

Des essais de prise et de résistance à la compression ont été également réalisés sur la pâte de ciment et sur le mortier normalisé, afin de vérifier la qualité de ciment utilisé. Les résultats obtenus des propriétés physico-mécaniques du ciment sont résumé dans le tableau II.2, Selon les résultats, Le ciment répond aux exigences fixées par les normes.

Tableau II.2. Caractéristiques physico-mécanique du ciment CPA CEM I 42.5.

Caractéristiques		**Valeur**	**Norme**
Finesse (cm^2/g)		3370	NF EN 196-6
Masse volumique absolue (g/cm^3)		3.15	**[180]**
Consistance normale (%)		27	NF EN 196-3
Temps de prise (min)	Début	170	**[181]**
	Fin	255	
Résistance à la compression(MPa)	28 j	≥ 42.5	NF EN 196-1 **[182]**

II.2.2. Les additions minérales

Nous avons utilisé dans notre étude trois types d'additions pour la substitution du ciment : le laitier, la pouzzolane naturelle et le calcaire.

II.2.2.1. Laitier de haut fourneau

Le laitier utilisé provient du complexe sidérurgique d'El-Hadjar. Il est fourni sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm et de couleur jaunâtre (figure II.3). Le laitier est ensuite réduit en poudre avec une finesse de 3500 cm^2/g. Le temps de broyage est fixé à 125 min. Sa masse volumique absolue est de 2857 kg/m^3. Les résultats de sa composition chimique sont fournis dans le tableau II.3 :

Tableau II.3. Caractéristiques chimiques du laitier d'El Hadjar.

Composition chimique (%)									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	MnO	K_2O	SO_3	TiO_2	Total
40,10	6,00	2,00	42.20	4,70	2,60	1,20	0,15	1,20	101,15



Figure II.3. Poudre de Laitier avant broyage(a) et après broyage(b).

II.2.2.2. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane utilisée dans notre recherche provient de la région de Béni-Saf(figure II.4) et fournie par la cimenterie de LAFARGE. Cette pouzzolane de couleur grise rougeâtre est fournie sous forme de pierres concassées et est ensuite broyée à une finesse de 3500 cm^2 /g. Le temps de broyage a été fixé à 43 min. Sa masse volumique absolue est de 2590 kg/m^3. Sa composition chimique est donnée dans le tableau II.4 :

Tableau II.4. Caractéristiques chimiques de la pouzzolane de Béni-Saf**.**

Composition chimique (%)										
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	SO_3	K_2O	PF	RI	Total
46,40	17,5	10,50	9,85	3,45	3,40	0,40	1,50	4,31	-	97,31



Figure II.4. Poudre de Pouzzolane



Figure II.5. Poudre de Calcaire

II.2.2.3. Calcaire

Le calcaire utilisé dans cette étude, est extrait de la carrière d'Ogaz (Sig,Mascara, Algérie) et fourni aussi par la cimenterie de LAFARGE (figure II.5). Cette addition de couleur blanc jaunâtre est fournie sous forme de pierres concassées et est ensuite broyée à une finesse de 3500 cm^2 /g. La vitesse de broyage a été fixée à 8 min pour 50 g. Sa masse volumique absolue est de l'ordre de 2544 kg/m^3. Sa composition chimique est reportée sur le Tableau II.5, son titre (teneur en $CaCO_3$) est 95,80 %.

Tableau II.5. Caractéristiques chimiques des calcaires.

Composition chimique (%)										
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	RI	PF	Total
0,85	0,93	0,56	53,08	0.23	0,60	0.08	0,53	0,52	42,55	99.57

II.2.3. Granulats

II.2.3.1. Sable

Pour que le module de finesse du sable utilisé soit environ 2,50 ; on a combiné deux types de sable: fin de Hassi Bahbah (40%) et grossier de Mont Guorno (60%) dont les propriétés physiques d'identification sont présentées au tableau II.6 et ses courbes granulométriques, sont présentées sur la figure II.6.

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

Caractéristiques	Type de sable		Normes
	Roulé	Concassé	
Provenance	Hassi Bahbah	Mont Guorno	
Classe granulaire	0/3	0/5	NF EN 933-1**[183]**
Module de finesse	1,06	3,45	NF EN 933-1**[183]**
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,59	2,63	NF EN 1097-6**[184]**
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,42	1,53	NF EN 1097-3**[185]**
Equivalent de sable (%)	61,13	41,31	NF EN 933-8**[186]**
Taux d'absorption d'eau (%)	0,04	0,38	NF EN 1097-6**[184]**

II.2.3.2. Gravier

Le gravier utilisé est un gravier concassé à deux classes granulaires (3/8 et 8/15) provenant de la carrière de Mont Guorno de la région de Berouaguia (Médéa) dont les propriétés physiques et mécaniques sont présentées au tableau II.7 et la courbe granulométrique est présentée dans la figure II.9.

Tableau II.7. Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés.

Caractéristiques	Fraction 3/8	Fraction 8/15	Normes
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,66	2,67	NF EN 1097-6 **[184]**
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,37	1,34	NF EN 1097-3**[185]**
Taux d'absorption d'eau (%)	0,19	0,52	NF EN 1097-6 **[184]**
Résistance aux chocs(Los-Angeles)	27,92	24,60	NF EN 1097-6**[187]**

D'après les résultats du tableau II.7, il parait que les gros granulats sont de bonne qualité et peuvent être utilisés pour la confection du béton autoplaçant.

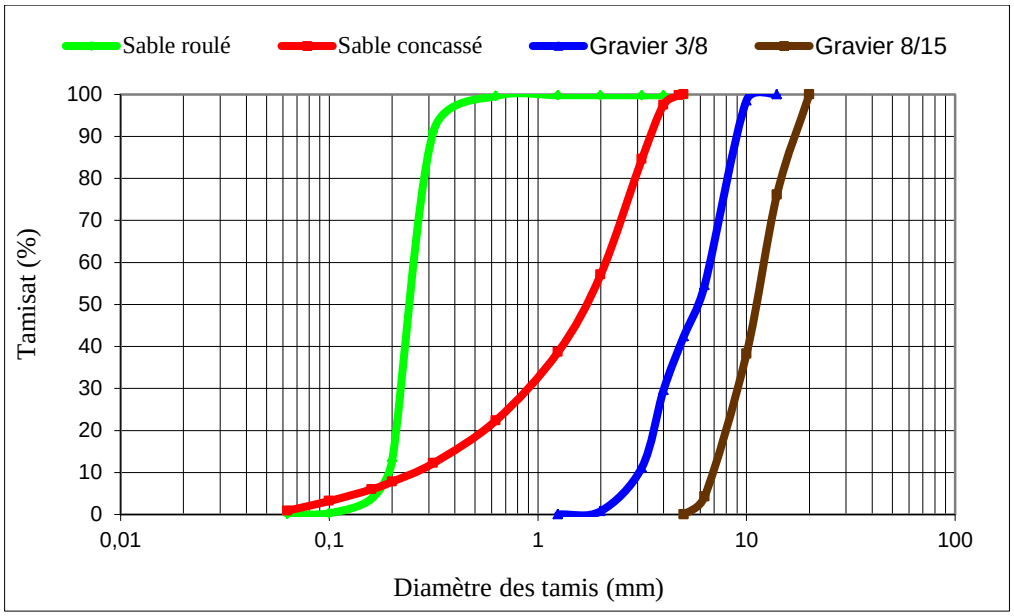


Figure II.6. Courbes granulométrique des granulats utilisés.

II.2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la fabrication du béton est celle de la distribution générale considérée comme potable, exempte de toute impureté nuisible au béton et conforme à la norme NF EN 1008 **[188]**.

II.2.5. Adjuvant

Le superplastifiant utilisé dans cette étude est un haut réducteur d'eau de la troisième génération fournie par la société Granitexe-NP et commercialisé sous le nom « MEDAFLOW 145 », de type polycarboxylate est formulé à base de polymère de synthèse combinée. Il ne présente pas d'effet retardataire. Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,3 à 2 % du poids de ciment et ses caractéristiques sont présentées dans le tableau II.8 suivant.

Tableau II.8. Caractéristiques du superplastifiant utilisé.

Forme	Couleur	Extrait sec(%)	Densité	PH	Teneur en chlorure (g/l)
liquide	Marron	30±1.5	1,065 ± 0.015	5 – 6	< 1

II.3. Formulations

La formulation du béton est une étape très importante dans le but d'obtenir un béton ouvrable, résistant et durable. En général, la formulation du béton dépend des caractéristiques souhaitées à l'état frais et à l'état durci. Pour les BAP, la formulation semble plus complexe, puisque les BAP possèdent des propriétés spécifiques et contradictoires à l'état frais : une grande déformabilité, une grande capacité de passage et une grande résistance à la ségrégation. Ces propriétés doivent être en balance pour obtenir un bon BAP.

Du moment que le mortier occupe un volume important dans les BAP (presque 70% du volume du BAP), et que la rhéologie du BAP est fortement liée à celle du mortier autoplaçant(MAP), les résultats d'essais sur le MAP seront concluants et peuvent donner une grande idée sur le comportement rhéologique du BAP.

Selon Jin et Domone **[189]**, des tests sur les mortiers sont indispensables car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominants.

- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.

- Tester un mortier est beaucoup plus commode et simple que tester un béton.

II.3.1. Formulation du Mortier autoplaçant

Afin de déterminer les quantités des matériaux : ciment, granulats, eau et adjuvant, nous sommes basés sur la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par OKAMURA, avec quelques modifications sont apportées au niveau de la teneur en sable dans le mortier (S/M), le rapport eau/ciment (E/C) ainsi que le rapport superplastifiant/ciment (S_P/C)et ceci dans le but de s'adapter avec les exigences des matériaux locaux et d'obtenir de bonnes caractéristiques du BAP à l'état frais.

II.3.1.1. Rapport Sable / Mortier (S/M)

Les auteurs de la méthode générale ont limité le volume du sable à 40% (Sable/Mortier= 0,4) de celui du mortier pour obtenir un meilleur MAP à base de matériaux locaux japonais **[16]**. Or, ceci est loin d'être toujours le cas, puisque l'utilisation du BAP à travers le monde a montré qu'il est nécessaire de modifier ce volume, pour qu'on puisse produire un MAP de

grande déformabilité **[17]**.Domone **[11]** a analysé 68 cas de BAP ayant été utilisé dans divers pays du monde. Cet auteur a rapporté que dans plus de 80% des cas étudiés le volume du sable utilisé est compris entre 41 et 52%. En Algérie, Boukendakdji **[17]** a formulé des BAP à base de matériaux locaux. Cet auteur a montré qu'un rapport S/M égal à 0,5 est adéquat pour obtenir un bon BAP.

Afin de minimiser le nombre de variables pour le mortier autoplaçant de référence, nous avons jugé judicieux de maintenir fixe le rapport S/M. Dans notre étude, nous nous sommes basés sur les travaux de BOUKENDAKDJI **[17]**. Le rapport S/M a été fixé à 0,5.

II.3.1.2. Ajustement des rapports Eau / liant(E/L) et Superplastifiant / Liant (S_P/L)

En général, les BAP sont caractérises par un faible rapport Eau/Poudre (E/L<0,5) **[74]**, pour limiter la quantité d'eau libre et améliorer par conséquent leurs résistances à la ségrégation. Certains auteurs ont trouvé que des rapports E/L variant entre 0,84 et 1,07 en volume ou entre 0,28 et 0,45 en masse sont convenables pour produire un BAP de bonnes caractéristiques à l'état frais et à l'état durci. Des valeurs prises en dehors de ces plages peuvent causer un blocage ou une ségrégation du BAP **[79]**.

Boukendakdji **[17]** a rapporté qu'il faut aller jusqu'à un rapport E/L égale à 0,4 pour obtenir un MAP satisfaisant ayant un étalement supérieur à 27 cm.

Le rapport E/L est gouverné donc par les propriétés des BAP à l'état frais plutôt que la résistance ou la durabilité. Ces dernières sont prises en considération d'une manière indirecte, puisque les BAP possèdent un faible rapport E/L et un volume de pate élevé, ce qui contribue à l'amélioration de leurs résistances et durabilités.

La sélection du rapport E/L et du rapport Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre 270 mm ≤ d ≤330 mm, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre 2 sec ≤ t ≤ 10 sec**[99]**. Ces rapports sont déterminés comme suit : pour chaque rapport E/L, on fait varier le dosage en SP de 1,2 à 1,8%. Les rapports optimaux E/L et SP/L sont ceux qui peuvent donner simultanément un bon MAP. Il faut noter ici que le mélange de mortier ne comportera aucune addition minérale.

I.3.2. Formulation du BAP de référence

Une fois que la composition du MAP de référence sera obtenue, on ajoute des gravillons pour composer le BAP de référence conformément à la méthode générale de formulation.

Le BAP de référence sera ensuite testé moyennant l'essai d'étalement au cône d'Abrams pour valider les rapports déterminés précédemment notamment les rapports E/L et SP/L. Pour accepter ces rapports, le mélange obtenu doit avoir un étalement variant entre 65 et80cm **[12]**, et ne doit pas présenter aucun signe visuel de ségrégation ou de ressuage. Dans le cas contraire, ces rapports doivent être réajustés.

En suivant la procédure d'exécution de la méthode générale, on remarquera que l'étape des essais sur mortier est une étape primordiale car elle permet de fixer les rapports E/L (eau/liant), S/M (sable/mortier) ainsi que Sp/L (superplastifiant/liant).

II.3.3. Remplacement du ciment par l'addition minérale

Dans cette recherche on a étudié l'effet de type d'addition sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçant traités thermiquement, Pour cela, le ciment du BAP de référence est substitué partiellement par l'une des additions employées dans cette étude (laitier, pouzzolane ou calcaire),et pour éliminer les effets de la finesse et le taux de substitution on a choisi de les fixer, Le choix de ces deux paramètres est basé sur les résultats des recherches [13, 17, 78 et121] qui sont faites sur les même matériaux provient des même carrières.

Allali **[121]** a étudié l'effet de la pouzzolane sur la rhéologie des bétons autoplaçants, Il a modifié le pourcentage de substitution (0 à 25%) et la finesse de l'addition (3500, 4200 et 5000 cm^2/g) ; Selon ses résultats le BAP a présenté une meilleur ouvrabilité pour un taux de 15% et une finesse de 3500cm^2 /g.

Hammat **[78]**a variée la finesse (3500, 4200 et 5000 cm^2/g) et le taux de substitution (0 à 50%) de la pouzzolane et du laitier pour voir l'influence du laitier et de la pouzzolane sur les différentes propriétés du BAP, Elle a conclu que la finesse et le taux ne doivent pas dépasser 5000cm^2/g et 30% respectivement, 15% d'additions (pouzzolane ou laitier) et 3500cm^2/g de finesse ont donné de bon résultat sur les essais d'ouvrabilité, résistance et retrait.

Boukandakdji **[17]** a utilisé un laitier d'une finesse de 3500cm^2/g et il a modifié le taux de substitution (0 à 50%), du point de vue ouvrabilité et rhéologie, il a trouvé qu'une teneur en

laitier de 15% peut donner un bon béton autoplaçant sans ressuage ni ségrégation, Et pour la résistance mécaniques, il a observé une faible diminution en présence du laitier et qu'elles sont rattrapées à long terme, au-delà de 28 jours.

Bensebti **[13]** a utilisé le calcaire comme addition, entre les deux pourcentages choisis, le taux de 17% a mené à une augmentation de résistance de 35% par rapport à un taux de 33% de calcaire. Suite aux résultats précédentes, on a utilisée des additions broyée à une finesse de 3500cm²/g avec un taux de substitution fixé à 15% pour toutes les additions.

II.3.4. Procédure de malaxage

La différence majeure entre la composition du béton autoplaçant et celle du béton courant est la présence du superplastifiant dans le premier. L'objectif de l'utilisation de cet adjuvant est d'obtenir un BAP de grande fluidité **[190]**. Cette dernière est cependant liée principalement au temps d'addition du superplastifiant durant le processus de malaxage, c'est-à-dire au début ou au cours de ce processus, et à la durée de malaxage du mélange. Domone et Jin **[194]** ont montré que le temps optimum pour l'ajout du superplastifiant à base de polycarboxylates est 0,5 à 2 min après le début du processus de malaxage. Un tel temps permet d'obtenir un mélange de grande fluidité et de meilleur maintien d'ouvrabilité.

Boukendakdji **[17]** a rapporté que l'efficacité du SP est d'autant plus grande lorsqu'il est ajouté (avec 30% de l'eau) après l'humidification du béton (70% de l'eau de gâchage ajouté au début de malaxage).

En ce qui concerne la durée de malaxage, les MAP et BAP ont une durée de malaxage plus longue, ce qui a pour effet d'assurer une meilleure dispersion des particules de la poudre par le superplastifiant. Certains auteurs **[1,191]** ont proposé des durées de malaxage variant entre 3 et 4 min. Pedersen et al. **[192]** ont rapporté qu'une durée de malaxage excédant 5 min est préférée. En se basant sur ces recommandations et sur les travaux cites **[17,193]**, deux procédures de malaxage sont adoptées : une pour le mortier et l'autre pour le béton.

II.3.4.1. Cas de mortier

Apres avoir calculé la quantité de chaque élément entrant dans la composition du MAP (voir exemple de calcul dans l'annexe A), on procède à un malaxage sec de la poudre et du sable pendant 60 secondes pour homogénéiser le mélange, on ajoute ensuite 70% de l'eau de gâchage avec un début régulier dans le reste de la première minute. Durant la minute suivante,

on introduit régulièrement le superplastifiant avec l'eau restante (après les avoir mélange). Le malaxage est continu pendant 3 autres minutes. La figure II.7 résume toutes ces étapes.

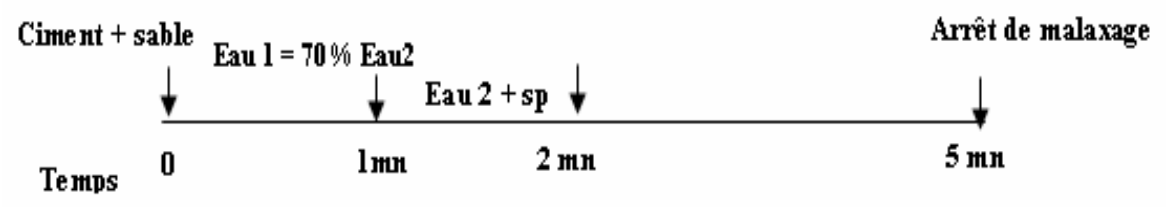


Figure II.7.Séquence de malaxage du mortier autoplaçant [99].

II.3.4.2. Cas de béton

Un exemple de calcul des quantités des constituants du BAP est donne dans l'annexe B. Une fois que toutes les quantités seront calculées et pesées, dans un malaxeur (figure II.9) on procède à un malaxage sec de la poudre, du sable et des gravillons pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange. Puis on ajoute 70% de l'eau de gâchage avec un débit régulier dans les 60 secondes suivantes. Durant toute la minute suivante, on introduit régulièrement le superplastifiant avec l'eau restante (après les avoir mélange). Le malaxage est continu pendant 5 autres minutes. Le malaxage est arrêté ensuite pendant 2 minutes, puis recommencé durant 30 secondes avant le déchargement. La figure II.8 récapitule toutes ces étapes.

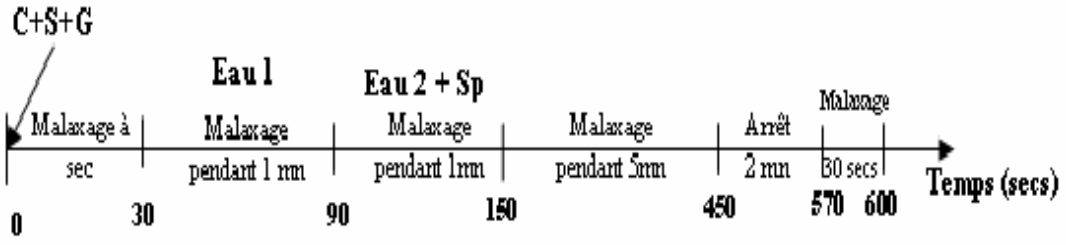


Figure II.8.Séquence de malaxage du béton autoplaçant [99].



Figure II.9. Malaxeur pour béton.

II.3.5.Confection et conservation des éprouvettes

Le coulage des éprouvettes dans les différents moules destinés aux essais à l'état durci est réalisé sans vibration ni compactage. Les moules ont été conservés 24 heures à une température ambiante après leur coulage. Une fois le démoulage effectué, les éprouvettes sont subit plusieurs type de cure :

- Dans l'eau, A 20± 2°C jusqu'au jour d'essais
- Dans l'eau, 7 jours à 40± 2°C puis à 20± 2°C jusqu'au jour d'essais
- Dans l'eau, 7 jours à 60± 2°C puis à 20± 2°C jusqu'au jour d'essais
- Dans l'eau, 7 jours à 80± 2°C puis à 20± 2°C jusqu'au jour d'essais

Les différentes formes d'échantillons moulées pour les essais programmés sont les suivantes, données pour une seule formulation :

- Cubiques 10x10x10 cm : trois éprouvettes pour la résistance mécanique à la compression.
- Prismatiques 7x7x28 cm : trois éprouvettes pour la résistance à la traction.
- Cylindriques 16x32 cm : trois éprouvettes pour le module d'élasticité.

Après une profonde recherche sur l'effet de la durée de cure sur les performances du béton on a choisi une cure de 7 jours à une température élevée basant sur les résultats des recherches suivantes;

Bendjillali **[47]** a prouvé que Sept jours d'arrosage est une durée très bénéfique dans les deux milieux de conservation (air et eau). Le taux d'évolution de la vitesse du son dépasse 100%. L'effet de 7 jours de protection par le produit de cure est plus important à l'air libre.

Kim et al. **[193]** ont trouvé que la variation de la température après 7 jours n'a qu'un effet négligeable sur les résistances finales.En outre, l'effet de la durée de cure humide augmente avec le pourcentage du laitier, étant donné que, la réaction d'hydratation du laitier commence plus tard dans quelques jours. Cette réaction qui nécessite de l'eau, fait que, la durée de cure humide doit être plus longue pour permettre la fabrication continue des hydrates à partir du laitier **[194]**.

Un traitement durant 7 jours dans l'eau, entraîne une augmentation de l'indice de continuité Ic. Cette amélioration est de l'ordre de 1% ; 5% et 8% pour les dosages 150, 200 et 250kg/m^3 dans le cas de fillers de briques, et 5% ; 5% et 10% pour le cas de fillers de calcaires.

Ezziane **[195]** a étudié l'effet de la durée de cure à une température élevée sur la résistance en compression des mortiers à la pouzzolane, entre 1 3 et 7jours. Comme présenté dans le tableau II.9. D'âpres les résultats, 7 jours de cure a données les meilleurs résistances à 28 jours pour les deux températures de cure 40 et 60°C.

Tableau II.9. Résultats des résistances à la compression à 28 et 90 jours pour un mortier à la pouzzolane subissant une cure à température variable **[195]**.

	Résistance en MPa					
Types de cure	B-1-40	B-3-40	B-7-40	B-1-60	B-3-60	B-7-60
28 jours	31.4	30.9	33.2	25.4	26.8	27.6
90 jours	31.6	31.9	34.2	29.4	28.8	28.4

II.4. Protocole expérimental

II.4.1. Essais de caractérisation du Mortier autoplaçant

Les essais sur mortier frais ont pour but en premier temps de fixer les deux rapports E/L et SP/L. L'essai d'étalement vise à qualifier la déformabilité du mortier en mesurant son étalement, et à contrôler la stabilité du mortier en observant sa galette après l'arrêt de l'écoulement. La viscosité du mortier est évaluée en comptant le temps d'écoulement à travers l'essai au mini-entonnoir en V.

II.4.1.1. Essai d'étalement au mini-cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires, la moyenne est retenue. La figure II.10 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

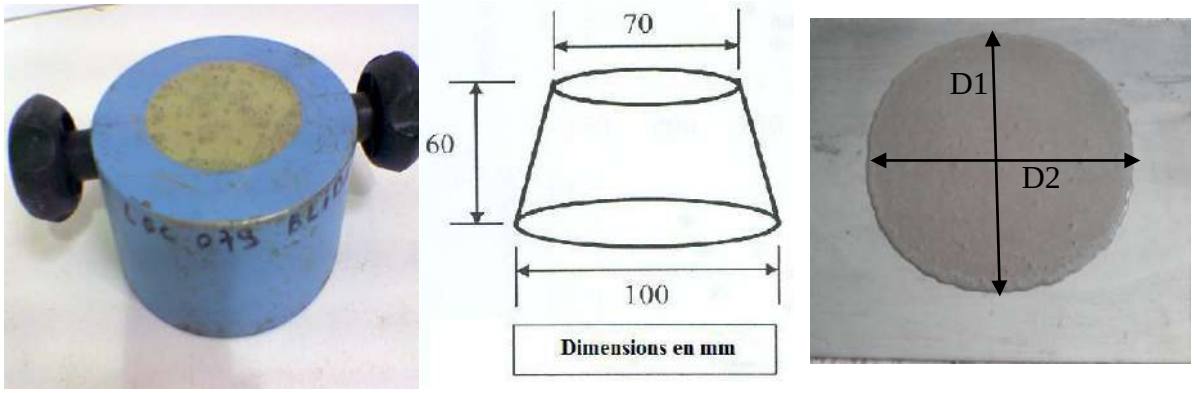


Figure II.10. Essai d'Etalement pour Mortier.

D'après les résultats des expériences réalisées sur des matériaux japonais par Nawa et al. **[196]**, L'étalement doit être compris entre 250 et 280 mm, Quant à Chai [190], qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm, un autre intervalle pris par Domone entre 270 et 330mm **[12].**

II.4.1.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est mesuré entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (figure II.11).

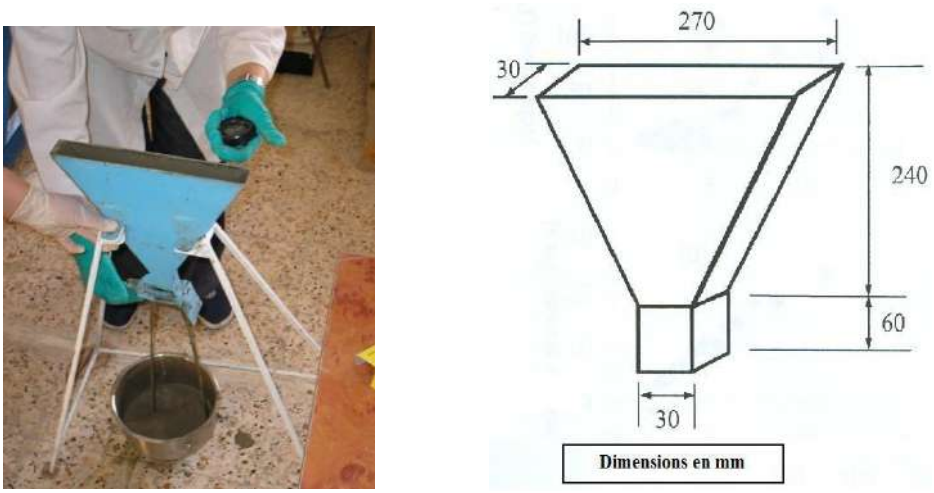


Figure II.11. Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier.

Le temps maximal d'écoulement dans l'essai de l'entonnoir en V est limité à 10s **[196, 197]** et la valeur minimale est fixé par chai **[197]** à 2s et par Nawa et al. **[196]** à 6s.

II.4.2. Essais effectués sur Béton frais

Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés nécessaires à l'état frais (voir I.1.2). Ils sont destinés à caractériser le béton avec les termes qualitatifs de fluidité, stabilité et absence de blocage.

Nous présentons dans cette partie les principaux tests d'ouvrabilité recommandés par l'AFGC **[51]**pour la caractérisation et la vérification des bétons autoplaçants.

II.4.2.1. Essai d'étalement

L'essai d'étalement est utilisé pour évaluer la déformabilité du BAP en milieu non confiné. L'essai peut être utilisé pour évaluer la capacité de remplissage à l'état libre en l'absence d'obstacles.

Un grand diamètre d'étalement indique une grande déformabilité et vice versa. Pour obtenir un BAP, des valeurs d'étalement variant entre 65 et 80 cm sont recommandées **[48]**. Le temps d'écoulement T50, qui présente la vitesse d'écoulement, peut donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange, L'EFNARC **[48]** recommande des valeurs de T50 bornées par 2 et5s. La stabilité du BAP peut être évaluée

visuellement en observant le processus d'écoulement et les bords de la galette après l'arrêt de l'écoulement. La présence d'une couche de laitance ou l'accumulation de gros granulats au centre de la galette est le signe de ségrégation.

Pour la détermination de l'étalement on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. On remplit le cône de l'échantillon de béton à tester, puis on soulève le cône lentement pour permettre au béton de s'étaler. Cette opération de soulèvement du cône doit durer 5 secondes environ. On mesure ensuite la taille de la galette de béton obtenue (figure II.12). Sa dimension correspond à la moyenne de deux diamètres mesurés. A cause de la nature visqueuse du BAP, les lectures des mesures d'étalement doivent se faire après stabilité de la galette, soit environ 60 secondes après soulèvement du cône **[51]**.

Avec le même essai, on mesurera le temps d'écoulement T_{50}, qui correspond au temps mesuré, à partir du commencement de l'étalement de la galette jusqu'à atteindre un diamètre de 500 mm. Ce temps d'écoulement T_{50} peut donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange **[49]**.

Notons ici que l'essai d'étalement est utilisé aussi pour estimer le temps du maintien d'ouvrabilité en mesurant l'étalement après une durée spécifiée (30, 60 ou 90min). Ce test est très important, car il permet d'estimer la durée pratique d'utilisation du BAP.

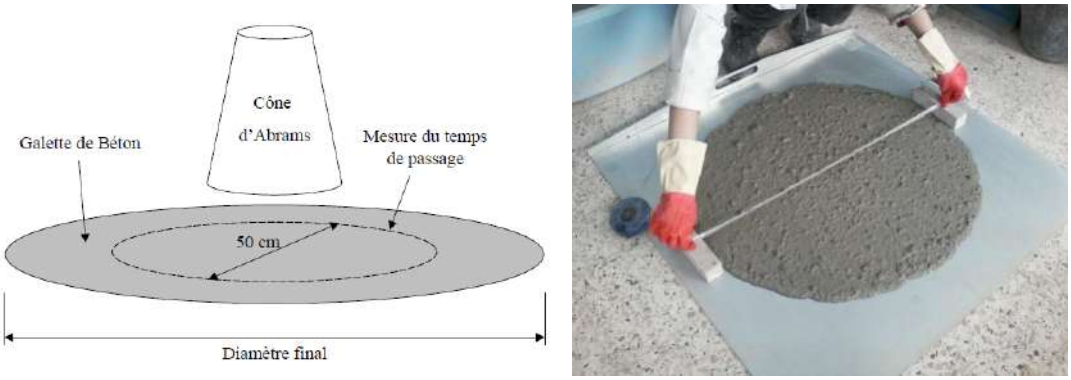


Figure II.12. Mesure du diamètre d'étalement d'un BAP.

II.4.2.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test)

L'essai de l'entonnoir mis en place par Ozawa et Okamura **[26]** permet d'évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir (en secondes).

On remplit l'entonnoir de béton, puis on laisse reposer pendant 1 minute. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice.

Comme l'essai de la capacité de remplissage, l'essai de l'entonnoir en V (figure II.13) nous renseigne sur la stabilité, c'est-à-dire l'existence de la ségrégation, ainsi que sur la viscosité du mélange étudié. S'il y a de la ségrégation, on observera un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir, ou si le mélange est trop visqueux, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important **[51]**.

Selon EFNARC **[48]** Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Il recommande un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité acceptable.

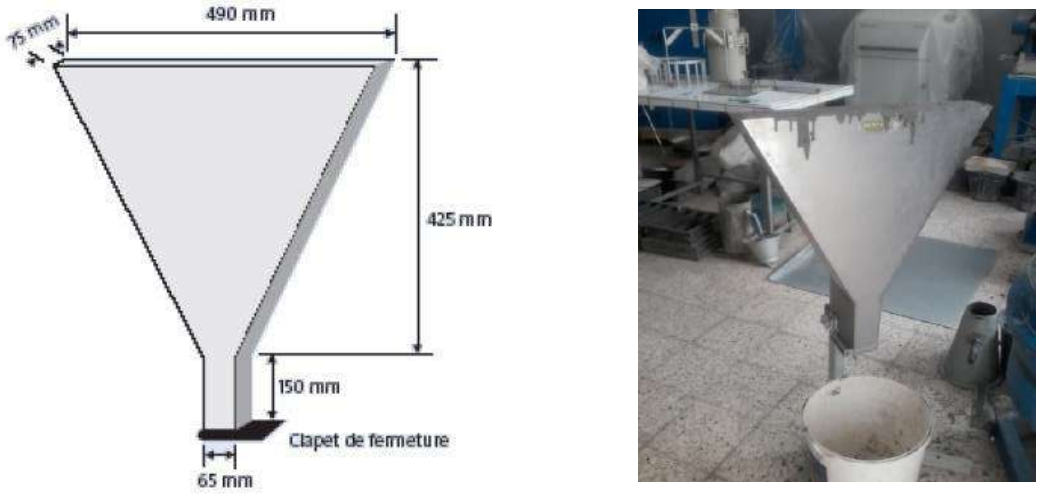


Figure II.13. Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).

II.4.2.3. Essai à la boite en L (L-BOX test)

Lors de cet essai, il est recommandé d'avoir un taux de remplissage supérieur à 80% **[14]**. C'est un indicateur de la ségrégation. Pour réaliser l'essai, la partie verticale de la boite est remplie. Les recommandations préconisent d'attendre 1 minute avant d'ouvrir la trappe. Nous avons utilisé une boite en L avec deux barres. Ce cas correspond à des ouvrages d'usage courants comme les bâtiments. Lorsque le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2.

Avec l'essai à la boite en L, il est possible de tester la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en L. On place le béton dans la « tour » de l'appareil (hauteur de 600 mm), soit environ 12,7 l de béton. On peut éventuellement laisser le béton au repos une (1) minute pour voir s'il y a de la ségrégation. Ensuite on retire la trappe et on mesure le temps (en secondes) que met l'échantillon de béton à s'écouler sur la longueur horizontale (figure II.14).

Ce test permet de caractériser la viscosité du mélange. De plus, la présence de barres simulant des armatures d'un coffrage renseigne sur la capacité de remplissage du mélange.

Après avoir soulevé la trappe, les paramètres suivants peuvent être mesurés :

- Le temps d'écoulement du T_{20} pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale).
- Le temps d'écoulement du T_{40} pour arriver à la distance 400 mm (dans la partie horizontale).

Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 (figure II.14).

On peut alors calculer le rapport H2/H1. Pour une bonne capacité de passage, une valeur du rapport entre 0,8 et 0,85 est acceptable. La capacité de passage et la résistance à la ségrégation, peuvent être détectées visuellement, si on observe un résidu de granulats dans la partie verticale du L (avant les barres de ferraillage), on pourra conclure qu'il y a soit blocage soit ségrégation. Si, par contre, on observe une bonne distribution des gros granulats tout au long de la partie horizontale du L-Box, on pourra dire que ce béton est homogène. Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour T20 et inférieures à 3.5 secondes pour T40 afin de rester dans un domaine autoplaçant **[198]**.

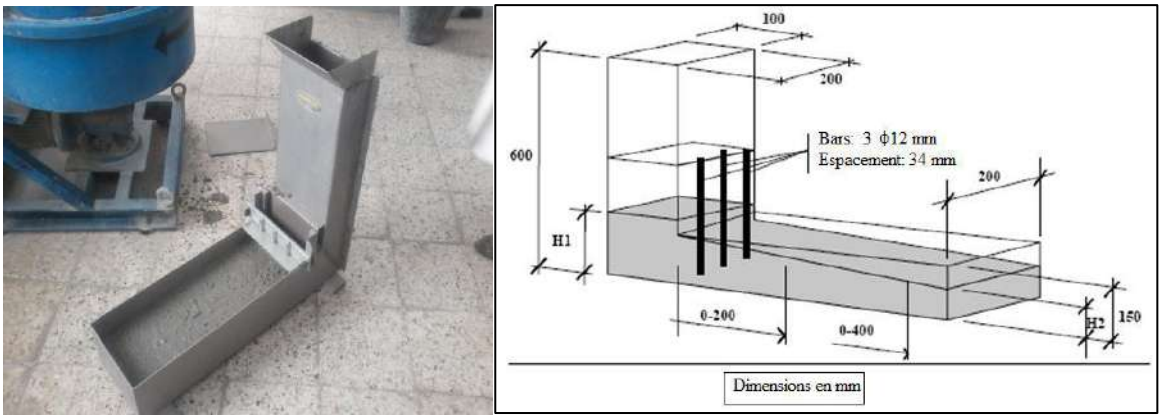


Figure II.14. Essai de la boite en L.

II.4.2.4. Essai de ségrégation dynamique au tamis

A travers cet essai, on peut quantifier le pourcentage en poids de laitance. Il caractérise le risque de ségrégation. Pour la réalisation de cet essai, il faut verser 10 litres deBAP dans un seau et le couvrir pour le protéger de la dessiccation pendant 15 minutes. Après 15 minutes, il faut verser 4.8 kg±0.2 kg de béton sur le tamis de 5 mm à une hauteur de chute de 50 cm ± 5 cm et relever la masse de béton traversant le tamis (figure II.15).

Le but est de déterminer la quantité de laitance dans le fond. Le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'expression suivante.

$$P = \frac{\text{Masse de laitance}}{\text{Masse de l'échantillon}}.100 \quad \text{Equation II.1}$$

Des valeurs de l'indice de ségrégation variant entre 0% et 15% est le signe d'une résistance satisfaisante à la ségrégation, entre 15% et 30%, la résistance est considérée critique, au-delà de 30%, la résistance est mauvaise **[199]**.

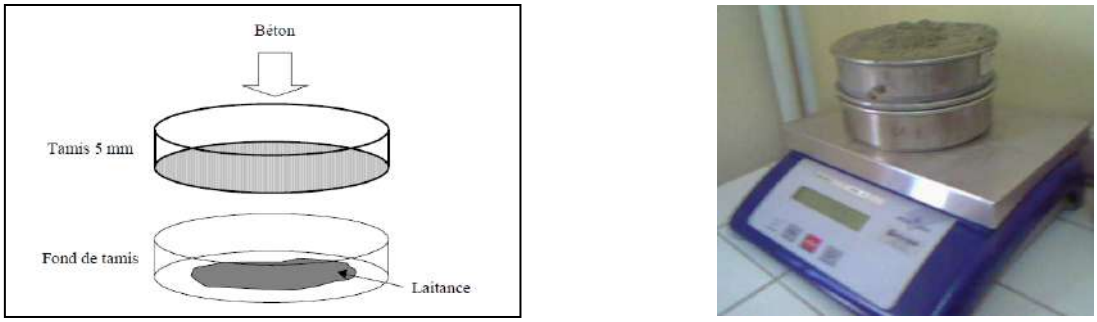


Figure II.15. Essai de stabilité dynamique au tamis.

II.4.2.5. Les masses volumiques

La masse volumique réelle du béton frais doit être systématiquement mesurée,cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique. Elle est mesurée par la pesée d'un récipient d'un volume connue remplis de béton autoplaçant sans vibrer.

Si m est la masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle) et m_0 celle du récipient vide, la densité est déduite par l'application de la formule suivante :

$$x = \frac{(m - m_0)}{V} \quad (Kg/m^3) \qquad \text{Equation II.2.}$$

OùM_{VR} : la masse volumique réelle du béton frais et

V : le volume du récipient utilisé.

La masse volumique réelle M_{VR} est normalement égale à la masse volumique théorique M_V calculée à partir de la formulation théorique du béton avec comme source d'incertitude la quantité d'air occlus.

II.4.2.6. Bilan

Nous avons cité les principaux tests empiriques qui sont destinés à caractériser l'ouvrabilité d'un béton autoplaçant. Nous représentons dans le tableau II.10 l'ensemble des tests avec les propriétés d'écoulement qu'ils peuvent mettre en évidence.

Tableau II.10. Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais.

Type d'essai	Mesure nécessaire	Conditions	Propriétés d'écoulements
Etalement au cône d'abrams	diamètre (mm)	550-850	Capacité de remplissage
	T50(s)	2-5	Vitesse de déformation
	Evaluation visuelle		Résistance à la ségrégation
V-FUNNEL (s)	Vitesse d'écoulement (s)	5-12	Vitesse de déformation Capacité de passage Viscosité
L-BOX	H2/H1	>0.8	Capacité de passage
	T20 (s)	<1.5	Vitesse de déformation Dans un milieu ferraillé
	T40 (s)	<3.5	
	Evaluation visuelle		Blocage des granulats
Stabilité au tamis	Laitance(%)	0-15	Stabilité

II.4.3. Essais relatifs au BAP à l'état durci

II.4.3.1.Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur des éprouvettes cubiques (10×10×10) cm^3suivant la norme en vigueur **[200]**, à 3,7, 28et 90 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN (figure II.16). L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture.



Figure II.16. Machine d'essai de compression.

II.4.3.2.Essai de traction par flexion

L'essai de résistance à la traction consiste à soumettre des éprouvettes prismatiques reposant sur deux appuis à une charge croissante concentrée au milieu jusqu'à la rupture (figure II.17). La charge est appliquée à l'aide d'une presse à lecture digitale reliée à un système d'acquisition (PC) par lequel on introduit la vitesse de chargement (50 N/s)suivant la norme en vigueur **[201]**. La force à la rupture est donnée par le même système. La résistance à la traction est obtenue en faisant un simple calcul de résistance des matériaux. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de (7×7×28) cm^3 à 3, 7, 28et 90 jours.

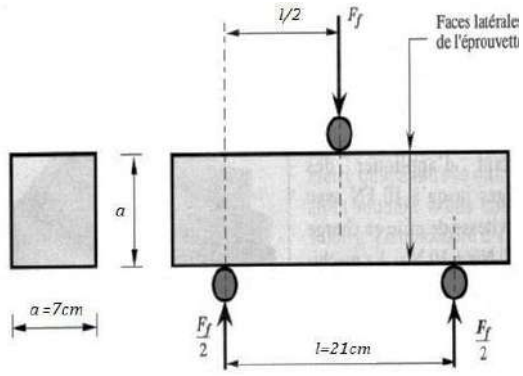


Figure II.17. Dispositif de l'essai de la résistance à la traction par flexion trois point.

Si P est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut PL/4 et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$\sigma_f = \frac{M}{I} v \text{(MPa)} \qquad \text{Equation II.3.}$$

Avec ;

$$I = \frac{b.h^3}{12} \text{ Equation II.4.}$$

V = h/2

$$\sigma_f = 1{,}5 \frac{PL}{b^3} \text{(MPa).} \qquad \text{Equation II.5.}$$

Contenue des dimensions b et L, si P est exprimée en newton (N), la résistance à la flexion exprimée en MPa vaut :

$$\sigma_f = 2.34x10^{-3} P \qquad \text{Equation II.6.}$$

II.4.3.3.La vitesse de propagation des ondes ultrasonique

La mesure de la vitesse de propagation d'ondes se fait moyennant un appareil d'auscultation sonique (ultrason), et conformément à la norme **[202].** Cet appareil est constitué d'un générateur d'impulsions électriques, de plusieurs transducteurs (un émetteur et un ou plusieurs récepteurs), et d'un dispositif de chronométrage.

L'appareil génère des impulsions électriques traversant l'échantillon du béton à partir d'un transducteur émetteur applique sur une surface plane. L'impulsion est captée par un transducteur récepteur également appliqué sur une surface plane en opposition et parallèle au premier. Notons ici que ces surfaces doivent être préalablement lubrifiées par la vaseline pour assurer une meilleure transmission des impulsions. Lorsque l'impulsion est captée par le récepteur, l'instrument affiche le temps de propagation (figure II.18).

Connaissant la distance entre les deux transducteurs, la VPO est donnée par la formulesuivante :

$V = \frac{l}{t}$ Equation II.7.

Ou V: vitesse de propagation d'ondes en m/s ;

l: distance entre les deux transducteurs en m ;

t: temps de propagation d'ondes en s.



Figure II.18. Dispositif pour mesure de la vitesse ultrasonique sue béton.

Il est possible de déterminer, à l'aide des ultrasons, la variation de la densité du béton selon la hauteur. En effet, le mortier, les granulats, eau et le vide ne transmettent pas le son à la même

vitesse, du moins dans les premiers jours du béton. A titre indicatif, le mortier d'un béton de un (01) jour permet une vitesse de son d'environ 3,2 km/s, alors qu'à 5-7 jours, cette vitesse est de 4,2 km/s. Dans les granulats, le son voyage habituellement à environ 5 km/s. ces différences peuvent donc servir à évaluer la quantité de granulats en fonction de la hauteur.

II.4.3.4.Module d'élasticité instantané

Pour évaluer le module d'élasticité en compression, on a fixé un extensomètre à béton sur des éprouvettes de béton cylindrique de (16X32 cm) avec l'application des cycles de charge et décharge jusqu'au le 1/3 de la charge de rupture de manière continue avec une vitesse de 0,5 MPa/s et suivant la norme en vigueur **[203]**. (figure II.19).



Figure II.19. Dispositif pour mesure du module d'élasticité du béton.

II.4.4.Méthodes de caractérisation physique et la durabilité des BAP

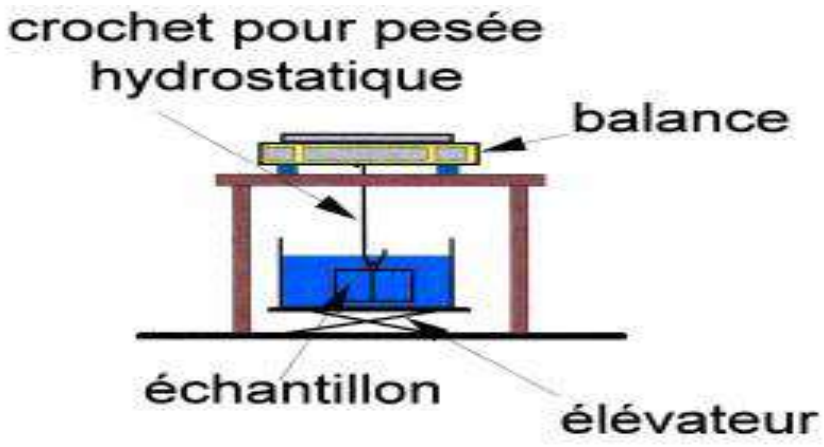
II.4.4.1.Essai de porosité accessible à l'eau des bétons

C'est le rapport du volume total des pores ouverts dans un corps poreux à son volume apparent suivant les recommandations de l'AFREM **[204, 205]**. Elle s'exprime en pourcentage du volume apparent :

$$\varepsilon(\%) = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} X100 \qquad \text{Equation II.8.}$$

Pour ce faire, trois échantillons de BAP ont été testés pour chaque formulation et après 28 jours de maturation. Il s'agit en réalité de peser les échantillons sous différents états. Dans un premier temps il faut s'assurer que les échantillons sont saturés en eau. Pour cela, ont les places dans un dessiccateur à vide, sous une dépression de 25 mbar pendant 4 heures, puis on immerge les échantillons dans l'eau, toujours sous vide, pendant 20heures ± 1heures. Après quoi les éprouvettes subissent une pesée hydrostatique.

Pour déterminer M_{eau} un échantillon est suspendu à l'aide d'un fil du système de suspension de la balance hydrostatique (figure II.20)et il est pesé complètement immergé dans l'eau. La pesée doit être effectuée à 0.001g prés. Déterminer la température de l'eau d'immersion



FigureII.20. Schéma de pesée hydrostatique.

Pour déterminer M_{air}il faut extraire l'échantillon de l'eau et l'essuyer rapidement et soigneusement, à l'aide d'une éponge ou d'un linge humide, afin de le débarrasser des goulettes et du film superficiel d'eau, sans toutefois retirer l'eau des pores et le peser immédiatement le corps d'épreuve dans l'air à l'aide d'une balance précise à 0.001g prés, Il faut s'assurer que l'évaporation de l'eau d'imbibition ne provoque pas de perte de masse appréciable pendant les opérations de pesées.

M_{sec} est obtenue après séchage de l'échantillon en l'exposant à 105±5°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante

II.4.4.2.Absorption d'eau par capillarité

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton préalablement conditionnée par un étuvage à 80°Csuivant les recommandations de l'AFREM **[204, 205]**. Les

échantillons testés sont des demi-prismes de surface de 7x7x7 cm (trois échantillons par composition).

Le préconditionnement des échantillons est le suivant :

A l'issue de la période de cure, les échantillons sont conservés dans une étuve ventilée à 80 ± 2°C. Durant cette période, le suivi de la masse est réalisé à intervalle de temps régulier, jusqu'à ce que la variation de masse entre deux pesées espacées de 24 heures soit inférieure à 0,05%. Les éprouvettes sont alors placées dans des sacs étanches puis remises dans l'étuve ventilée à 80 ± 2°C pendant 10 jours, afin de favoriser l'équilibre hydrique dans l'échantillon. Le sac est ensuite extrait de l'étuve puis conservé 12 heures à une température de 20 ± 2°C.

A l'issue de ce retour en température, l'éprouvette est sortie du sac. Sa surface latérale est alors enduite de résine (ou de papier aluminium autocollant) pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai, puis conservée environ 12 heures dans un dessiccateur à 20 ± 2°C pour permettre le durcissement complet de la résine.

L'essai d'absorption capillaire est réalisé à la suite de ce préconditionnement. Il consiste à suivre l'évolution de masse des éprouvettes plongées de 3 mm dans de l'eau (figure II.21). Les échéances de mesure sont les suivantes : ¼, ½, 1, 2, 4 et 24 heures.

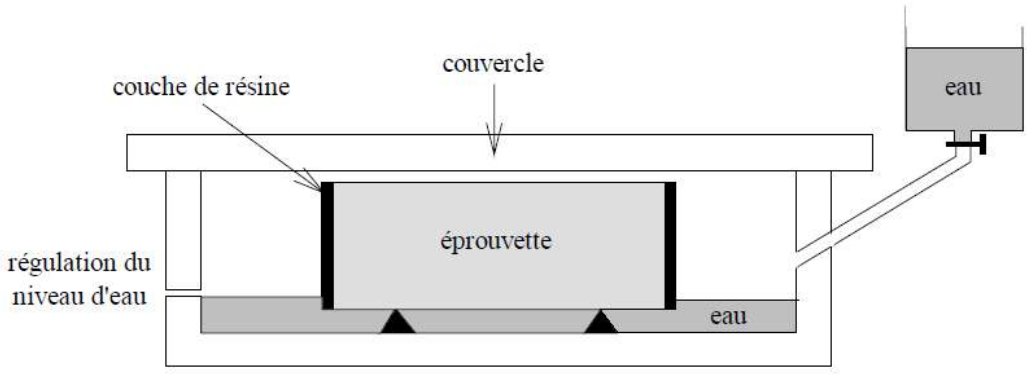


Figure II.21. Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité.

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$C_a\ (kg/m^2) = \frac{(M_x - M_0)}{A}$$ Equation II.9.

Où M_x : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg),

M_0 : masse initiale de l'éprouvette (kg),

A : section de l'éprouvette (m²).

La sorptivité est définie par la vitesse d'absorption par remontée capillaire, elle est obtenue par une régression linéaire de l'ensemble des mesures qui se trouvent dans un domaine d'évolution linéaire du coefficient d'absorption Cat, généralement, entre 1 et 8 heures. La sorptivité est donnée par l'équation II.8.

$$S = \frac{Ca_8 - Ca_1}{\sqrt{8} - \sqrt{1}}$$ Equation II.10.

Avec : S : est la sorptivité (kg/m^2/h½),

Ca8 et Ca1 : sont respectivement le coefficient d'absorption à 8 et 1 heures.

II.5. Conclusion

Afin de mettre en évidence les effets des additions minérales et la température de cure sur les propriétés des BAP, une caractérisation complète des matériaux et une mise en place de procédures expérimentales s'est avérée nécessaire. La première partie de ce chapitre a été consacré à cet effet, dans lequel, nous avons exposé les différents matériaux utilisés pour la formulation des BAP ainsi que leurs propriétés physico-chimiques. Il a été en même exposé la méthode de fabrication et des séquences de malaxage des différents mélanges de mortiers et bétons utilisés, ainsi qu'une présentation des essais nécessaires pour la vérification et la caractérisation des mortiers et bétons autoplaçant à l'état frais et durci.

CHAPITRE 3

PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, Nous présenterons les résultats des différents essais réalisés sur les bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci.

Nous proposons de compléter cette évaluation en intégrant les résultats présentés dans la synthèse bibliographique (voir chapitre I) aux résultats obtenus dans notre étude expérimentale. Toutes ces valeurs, déterminées expérimentalement, seront aussi comparées avec les prévisions de différents règlements existants ainsi que de modèles reconnus et associés aux différentes caractéristiques étudiées. Cette mise en commun permettra éventuellement de donner des lois générales sur l'ensemble des résultats.

L'objet du présent chapitre est de mettre en évidence les caractéristiques mécaniques et les propriétés de durabilité des bétons formulés. Ces propriétés sont aujourd'hui des critères incontournables pour valider la valorisation d'un sous-produit ou déchets dans le domaine des matériaux de construction.

III.2Formulation du béton autoplaçant

Formuler un béton, c'est de trouver un arrangement des divers constituants qui répond à un cahier de charge donné, pour un béton autoplaçant c'est complexe vue le nombre de constituants et sa particularité à l'état frais dont assurer une grande fluidité, une viscosité appropriée et de grande résistance à la ségrégation est nécessaire.

III.2.1Optimisation des rapports eau sur liant et superplastifiant sur liant

Cette optimisation a été faite à partir des deux essais sur mortier, la mesure d'étalement au mini-cône et la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour mortiers.

Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour des rapports E/L de 0.4 et 0.42 tout en faisant varier le rapport Sp/L entre 1,2 et 1,8 ; La formulation adoptée doit présenter un étalement entre 270 et330mm et un temps d'écoulement inferieur à 10s [12].

Les différentes compositions obtenues pour des mortiers autoplaçants ainsi que les résultats des essais d'étalement au mini-cône et du temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel), sont présentées dans le tableau III.1 suivant.

Tableau III.1. Composition et Résultats des essais sur mortiers pour différentes valeurs d'E/L et S_P/L.

Compositions		MAP1	MAP2	MAP3	MAP4	MAP 5	MAP6	MAP 7	MAP 8
S / M		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
E/L		0,4	0,4	0,4	0,4	0,42	0,42	0,42	0,42
Superplastifiant (%)		1,20	1,40	1,60	1,80	1,2	1,4	1,6	1,8
Ciment (Kg/m^3)		692	692	692	692	673	673	673	673
Sable (Kg/m^3)	Roulé	518	518	518	518	518	518	518	518
	Concassé	778	778	778	778	778	778	778	778
Eau(Kg/m^3)		287	286	285	284	293	292	291	290
Superplastifiant(Kg/m^3)		8,3	9,7	11,1	12,5	8,1	9,4	10,8	12,1
Etalement (mm)		220	241	244	259	264	267	281	287
Temps V-funnel (s)		21	17.53	14,78	8,73	7,31	7,2	6,29	4,1
Remarque		sec	sec	sec	sec	homogène	homogène	homogène	Ressuage

D'après les résultats présentés au tableau III.1, un rapport E/L de 0,4 n'est pas efficace, malgré l'augmentation du dosage de superplastifant le mortier est sec, l'étalement reste faible et le temps de V-funnel est toujours long, donc pour améliorer la fluidité et la viscosité il faut augmenter le rapport E/L à 0,42. Dès l'augmentation de la quantité d'eau, les mortiers ont présenté un aspect homogène pour un dosage de superplastifiant inférieur à 1,8 mais la fluidité n'est pas dans la fourchette exigée que pour un dosage de superplastifiant supérieur à 1,6. A la fin de cette phase, nous pouvons conclure que les rapports E/L de 0,42 et SP/L de 1,6 sont optimaux pour assurer les meilleurs caractéristiques à l'état frais avec un minimum possible du dosage en superplastifiant.

III.2.2Détermination des compositions des différents bétons autoplaçant

Les bétons utilisés dans cette recherche sont formulé selon la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par OKAMURA avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport eau/liant ainsi que le rapport superplastifiant/liant.

- Le rapport sable sur mortier (S/M) est fixé par 0,5 pour s'adapter avec les exigences des matériaux locaux basant sur les recherches de Boukendakdji **[17]**.
- Les rapports eau/liant (E/L) ainsi que le rapport superplastifiant/liant (S_P/L) ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs d'étalement au cône d'Abrams et du temps d'écoulement au V-Funnel acceptables (voir III.2.1).
- Diamètre maximale du gravier est limité par 15mm, 50% de la quantité de gravier est de fraction 8/15 et l'autre est de 3/8.

Les bétons avec additions sont formulés par la même composition du béton de référence avec une substitution de15% de volume du ciment par une addition minérale. Le tableau III.2 présente les différentes compositions des bétons autoplaçants.

Tableau III.2. Compositions des mélanges.

Dosages pondéraux Des constituants (kg/m^3)		**S/M = 0.5 ; G/S = 0.888 ; E/L = 0.42; Sp = 1.6 % ; addition = 15% Ciment**			
		Désignation des différents bétons			
		BAP T	BAPC	BAP L	BAPP
Ciment		467	404	400	403
Calcaire		0	57	0	0
Laitier		0	0	64	0
Pouzzolane		0	0	0	58
Sable	Roulé	360,8	360,8	360,8	360,8
	Concassé	541,2	541,2	541,2	541,2
Gravier	G1 (3/8)	401	401	401	401
	G2 (8/15)	401	401	401	401
Eau de gâchage		196	194	195	194
Superplastifiant		7,47	7,37	7,43	7,39

III.3Vérifications des bétons autoplaçants à l'état frais

Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir des tests empiriques conçus spécifiquement pour évaluer le caractère autoplaçant. Évidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais, la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation.

Afin de vérifier l'autoplaçance de nos différents mélanges, nous avons choisi pour la suite de ce travail, quatre essais, qui nous les avons jugés suffisant pour cette étape.

III.3.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams

D'âpres les résultats d'étalement des différents BAP, qui sont présenté sur la figure III.1, Tous les bétons ont des valeurs d'étalement qui s'inscrivent dans le domaine des bétons autoplaçants. Proche à la limite supérieure qui est de 800mm, le BAPC a un étalement de 784mm, qui améliorent l'étalement de façon remarquable, le BAPP jugé le béton le moins fluide a une valeur d'étalement de 675mm très proche à la limite inférieure de 650 mm, ceci est dû à la forte demande en eau de ce dernier, le BAPT et le BAPL ont présenté des valeurs intermédiaire de 704 et 736mm, Nous pouvons conclure que la composition choisis assure une bonne fluidité des bétons quel que soit l'additions.

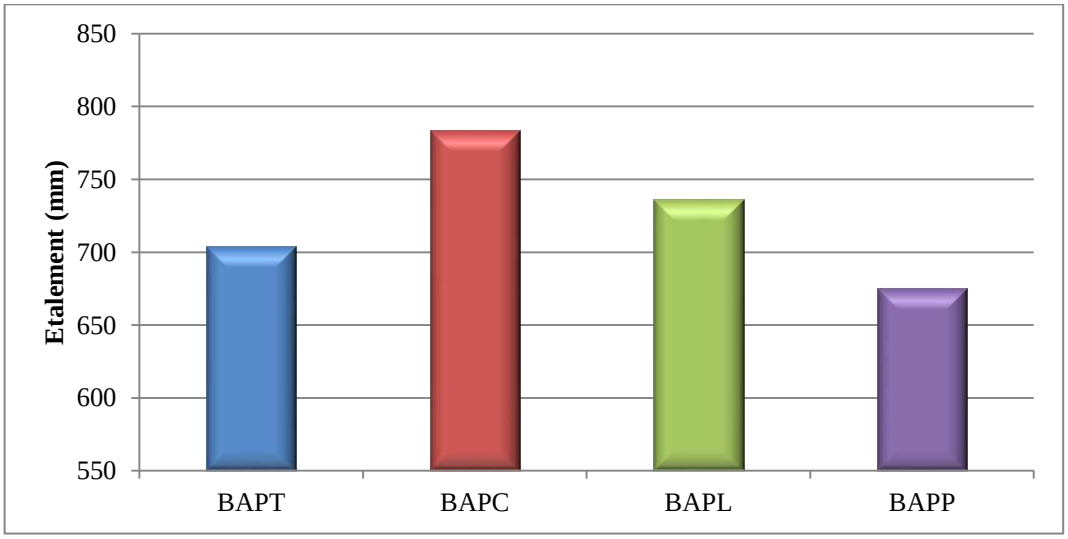


Figure III.1. L'étalement en fonction du type d'addition.

III.3.2Mesure du temps T50

Le temps T_{50} est réalisé conjointement avec l'essai d'étalement, il correspond au temps que met la galette de béton pour atteindre un étalement de 500mm, il nous renseigne sur la vitesse de déformation du béton

La variation du temps T50 au cône d'Abrams en fonction du type d'addition est présentée dans la figure III.2. D'après cette figure on remarque que tous les bétons ont données des valeurs appartient à la fourchette recommandé par L'EFNARC **[48]**, avec un temps d'écoulement de 2,3s ; le BAPC à la mise en place la plus rapide, le BAPL a un temps de 2,47s qui est inferieur a celui du BAPT (3,5s), le BAPP a enregistré l'écoulement le plus lent.

On peut affirmer que la substitution du ciment par les différentes additions a varié le temps T50 sans nuire au critère autoplaçant.

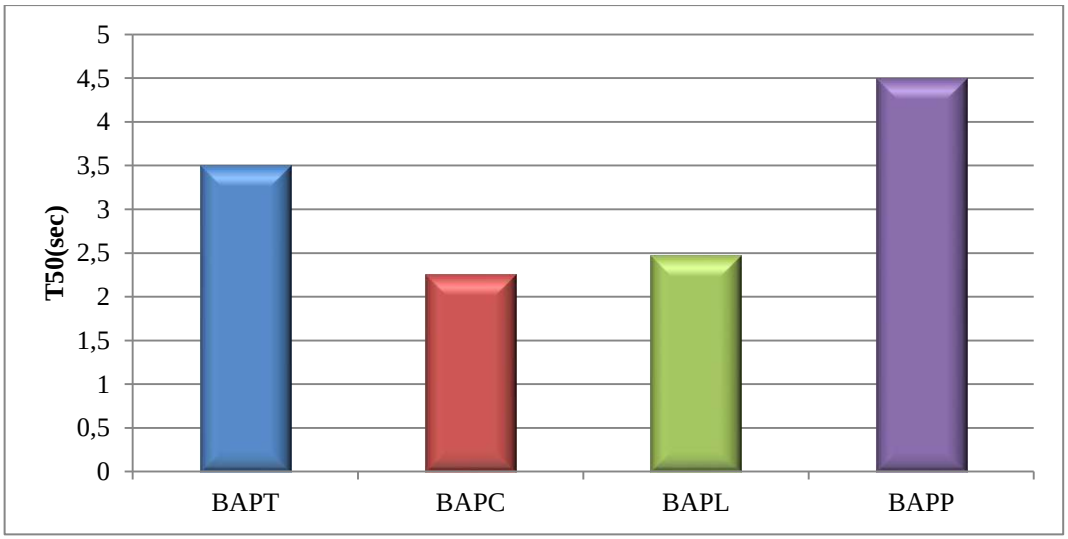


Figure III.2. Temps T50 au cône d'Abrams en fonction du type d'addition.

III.3.3 Mesure du Temps d'écoulement par l'essai d'Entonnoir en V

Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du type d'addition sont représentés sur la figure III.3. Le temps d'écoulements à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) du plus faible au plus long est de 4,13 4,52 5,73 et 6,79s pour les BAPC BAPL BAPT et BAPP respectivement, ces valeurs sont toutes dans le domaine recommandé par EFNARC **[48]** qui est de 2 à 10s pour obtenir un béton de viscosité suffisante et une bonne capacité de passage.

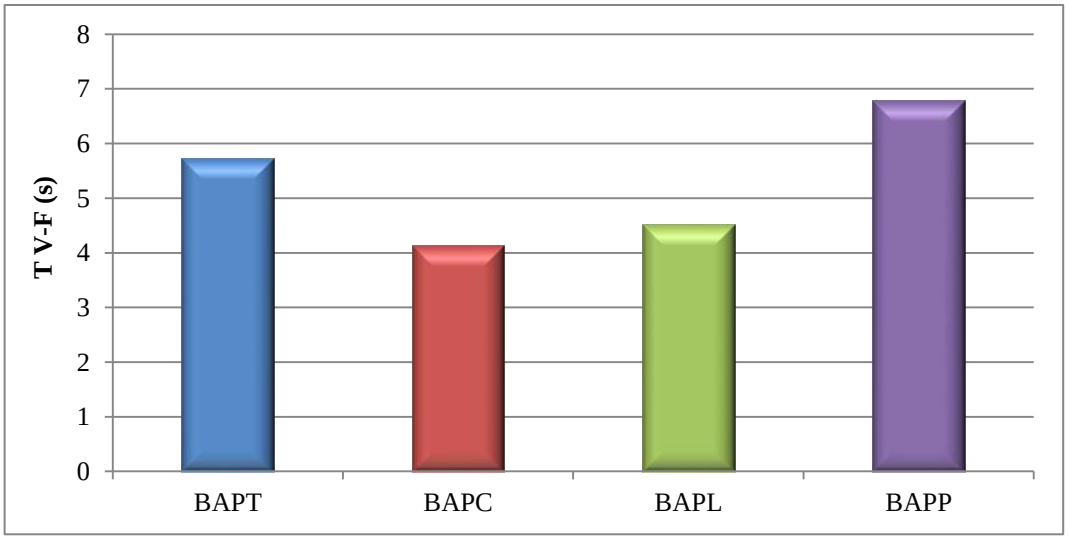


Figure 3.3. Temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du type d'addition.

III.3.4 Mesure du Rapport H2/H1 de l'essai de la Boîte en L (L-Box)

Avec l'essai à la boite en L, il est possible de tester la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant, il est recommandé d'avoir un taux de remplissage supérieur à 80% **[50]**, ce qui est vérifier pour tous les bétons, selon les valeurs de H1/H2 présentée dans la figure III.4, le BAPP a marqué la valeur la plus faible de 0,81 qui augmente légèrement jusqu'arrivé à 0,87 pour un BAPT, contrairement au BAPL et BAPC qu'ont présenté une très bonne capacité au passage par des valeurs de 0,91 et 0,97 respectivement.

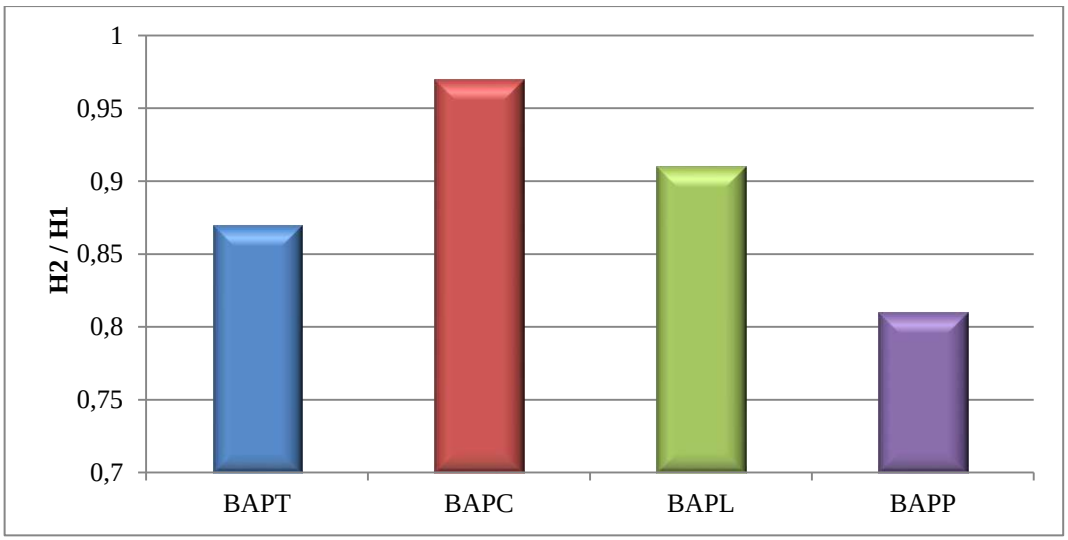


Figure III.4. Rapport H2/H1 de l'essai de la Boîte en L (L-Box) en fonction du type d'addition.

III.3.5 Essai de résistance à la ségrégation par tamisage

Des valeurs de l'indice de ségrégation inférieur à 15% est le signe d'une bonne résistance à la ségrégation **[96]**, Les indices de ségrégations des bétons utilisés sont présentés dans la figure III.5, Tous les BAP ont présenté des valeurs entre 2 et7% dont la résistance à la ségrégation est considérée comme satisfaisante.

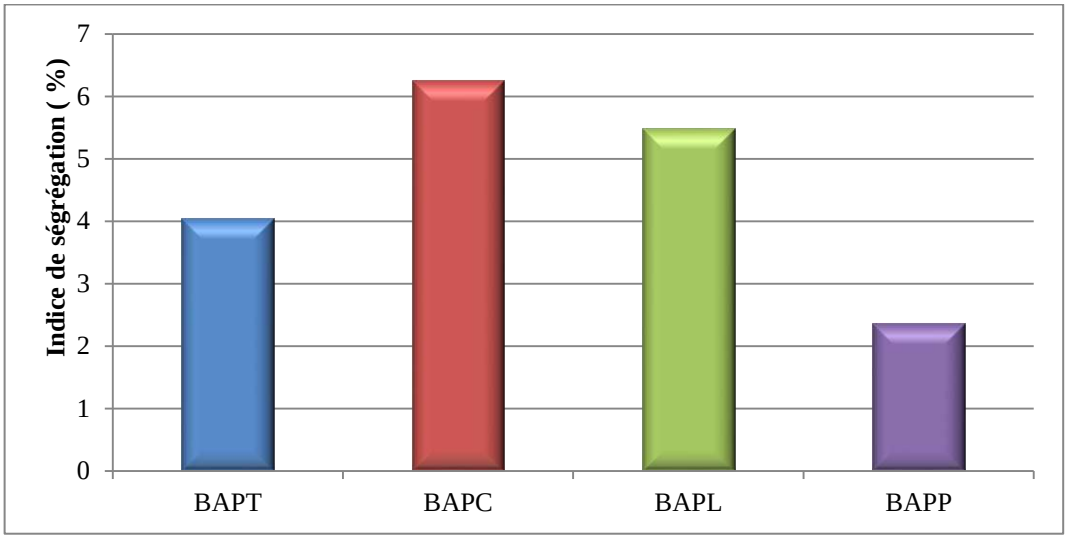


Figure III.5. Indice de ségrégation en fonction du type d'addition.

III.3.6 La perte d'ouvrabilité

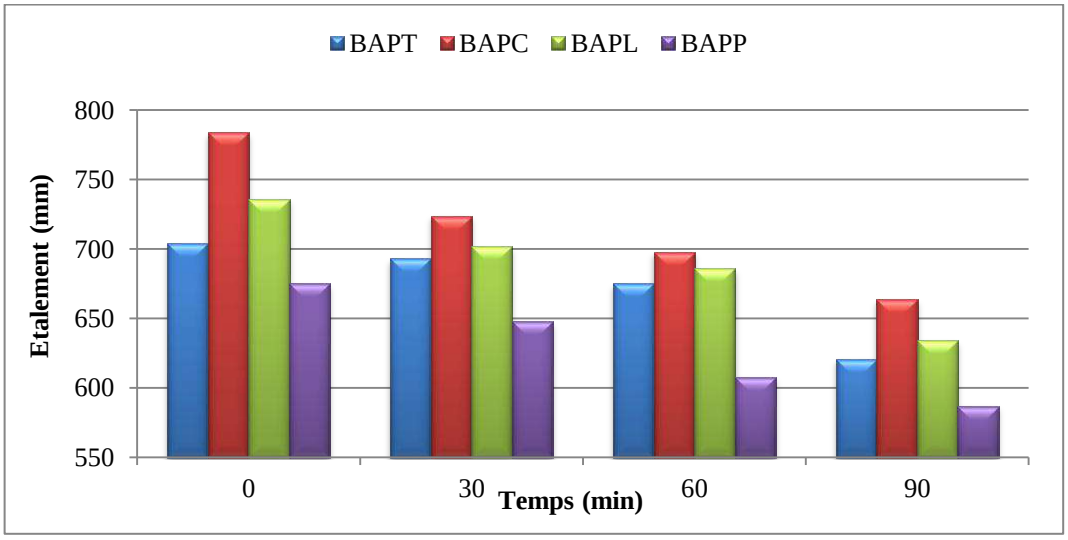


Figure III.6. La perte d'ouvrabilité des différents BAP en fonction du temps.

L'ouvrabilité des différents BAP à 0, 30, 60 et 90 minutes après malaxage est présentée par la figure III.6. On doit signaler ici que la perte d'ouvrabilité est elle-même un paramètre

rhéologique, elle donne la déformation du mélange en fonction du temps. Le BAPP qui a le plus faible étalement juste après malaxage, il a perdu son ouvrabilité rapidement d'ailleurs on a observé que toutes les valeurs d'étalements sont inferieur à 650mm à partir de 30minutes, contrairement au BAPC qui a gardé une bonne ouvrabilité même à 90 minutes. Concernant les BAPL et BAPT sont restés ouvrables jusqu'à 60 minutes. À partir de ces résultats, on peut ajouter le type d'additions comme facteur qui influe sur la perte d'ouvrabilité des bétons autoplaçants.

III.3.7 Bilan

Afin de vérifier les propriétés d'écoulement des bétons autoplaçants avec des additions de natures différentes. Quatre essais sont appliqués pour évaluer six paramètres qui peuvent nous diriger vers une conclusion concernant la faisabilité autoplaçante vis-à-vis de l'incorporation du calcaire, laitier de haut fourneau et la pouzzolane naturelle dans la formulation des bétons autoplaçants. Les résultats obtenus au cours de cette étude conduisent aux enseignements suivants :

- Tous les mélanges ont vérifié les propriétés d'écoulement d'un béton autoplaçant.
- L'incorporation du calcaire et du laitier de haut fourneau améliore toutes les paramètres à l'état frais, de façon remarquable le calcaire est le plus efficace.
- La pouzzolane naturelle dégrade la capacité des bétons au passage et au remplissage, ainsi qu'elle augmente le risque de ségrégation.

Après l'affirmation que la formulation adoptée, est convenable avec toutes les additions proposées pour avoir les bétons autoplaçant, la prochaine étape est consacrée à l'effet des additions minérales sur l'aspect durci des bétons autoplaçants à différentes températures de cure.

III.4.Effet des additions et de la température de cure sur les caractéristiques mécaniques.

On propose dans cette partie d'étudier les caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçant sans et avec additions conservés à différentes températures de cure. Pour bien éclaircir les résultats obtenus, deux parties sont proposés pour chaque essai.

La première partie (effet des additions) est dans le but de mettre en évidence la contribution des additions minérales à l'amélioration où la dégradation des propriétés mécaniques, une comparaison a été réalisée pour une même température de cure entre les propriétés des bétons avec additions et celles du béton sans additions (BAPT). Une deuxième partie (effet de la température de cure) est consacrée à la comparaison entre l'effet de l'augmentation de la température pour chaque type de béton.

III.4.1Résistance à la compression

a. Effet des additions

L'effet des additions sur la résistance à la compression en fonction de l'âge pour les différentes températures de cure est présenté par la figure III.7. Les résistances mécaniques progressent avec l'âge pour tous les BAP quelque soit la température de cure, cette augmentation est due au développement de l'hydratation en fonction du temps.

Les BAPC conservé à 20 et 40°C ont des résistances au jeune âge (3 jours) inferieures par 18,68% et 10,71% respectivement par rapport aux BAPT conservé dans les mêmes conditions, néanmoins un gain de résistance de 0,82% et 3,85% est observé à 60°C et 80°C. À partir de 7 jours et quelques soit la température de cure, le calcaire mène à une baisse de résistance.

Le laitier des hauts fourneaux a présenté la meilleure efficacité avec l'augmentation de la température de cure, en chiffre à 20, 40, 60 et 80°C, la différence de résistance entre un BAPL et un BAPT est de -17,04%, -3,87%, 0,42% et 19,10% à 3jours et 4,82%, 5,62%, 7,95% et 8,55% à 90 jours. L'augmentation de résistance se présente à un âge précoce plus la température est élevée, en effet le gain de résistance est observé à partir de 90jours et 28jours pour les températures 20°C et 40°C respectivement, et à partir de 3jours pour 60°C et 80°C

Le BAPP à un effet très important à 20°C avec ses résistances comparables à celle du BAPT jusqu'à 28jours et son gain de résistance de 4,82% à 90jours. À partir de 40°C la pouzzolane

naturelle s'avère inefficace en termes de résistance où on a remarqué une diminution de la résistance à tous les âges.

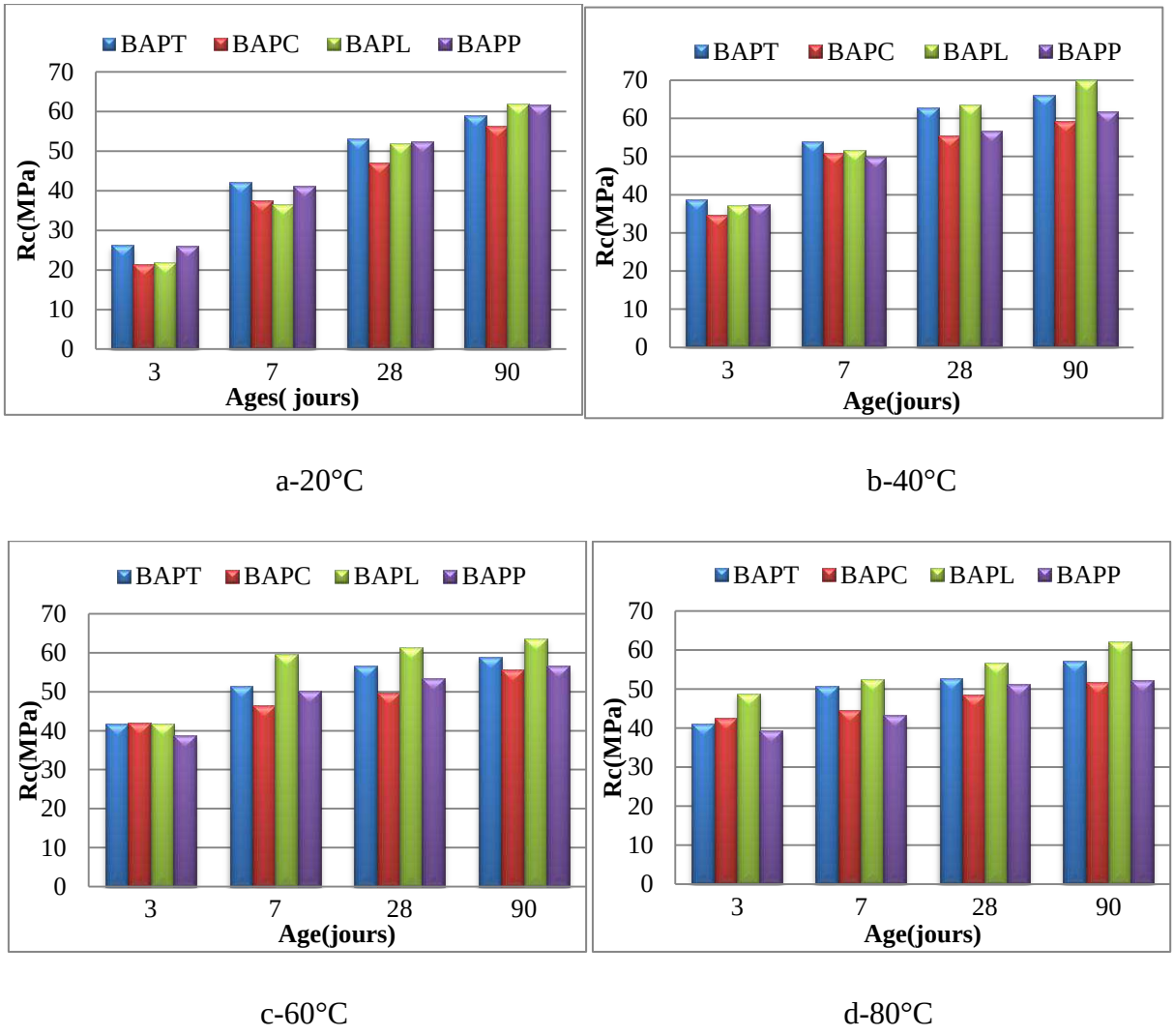


Figure III.7. Résistance à la compression en fonction d'âge des différent BAP à chaque température de cure.

D'après les résultats d'Ezziane **[206]** sur l'effet des additions à différentes températures de cure, des diminutions très importantes sont révélées par la substitution du ciment par 15% de calcaire à tout âge et pour toutes les températures de cure, contrairement, la pouzzolane a présenté une augmentation importante de la résistance à long terme à 20°C et 40°C et une légère diminution à 60°C.

Selon les recherches de Derabla **[173]**, l'incorporation de 20% de calcaire dans un béton autoplaçant est plus efficace à 28 et 90jours avec un traitement thermique de 60°C que sans traitement thermique.

Hadj Sadouk **[207]** a remarqué que pour les deux milieux de conservation (cure à 20°C et climat chaud), un taux de 15% de calcaire provoque des chutes de résistances des mortiers pour tous les âges d'essai.

Turkel et al. **[208]** qui révèlent que les ciments composés sont plus performants sous des cures thermiques et qu'ils ne subissent pas de fortes chutes de résistance à la compression.

Austin et Robins **[171]**, ont rapporté qu'entre 7 et 28 jours dans un climat chaud, la cure humide sur un ciment au laitier est très bénéfique sur la résistance qui peut dépasser celle du CPA. Une augmentation de 42% pour un ciment contenant 50% du laitier et seulement 28% pour un CPA. Cependant, le laitier est plus sensible au manque de cure humide que le CPA.

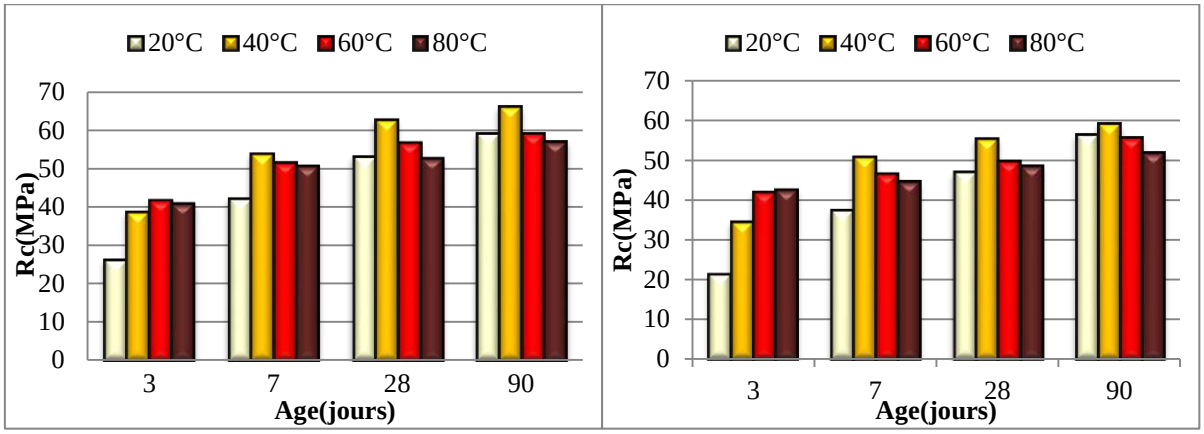
Ma et al. **[209]** ont conclu que la température suffisante pour activer le laitier doit être au-dessus de 40°C, mais au-dessous de cette température, la présence du laitier a pour effet de retarder l'hydratation.

Dans la littérature **[210]**, il est rapporté que le ciment au laitier est plus sensible à l'effet de la température de cure que le ciment Portland. Ceci justifie les résultats trouvés.

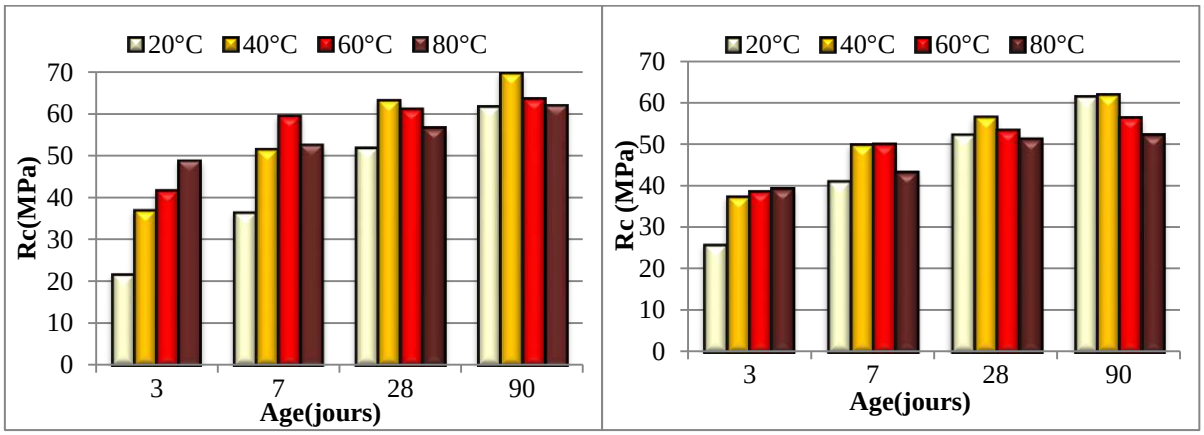
De même Battagin **[211]** a montré que le degré d'hydratation du laitier augmente considérablement avec la température ; 38% du degré d'hydratation est atteint à 5 jours sous 40°C, à 2 jours sous 60°C et à 1 jour sous 80°C.

D'autres part, Escalante-Garcia et Sharp **[148]** ont étudié l'effet de la température entre 10°C à 60°C sur la chaleur d'hydratation des ciments composés de laitier granulé et des cendres volantes durant les trois premiers jours, les résultats trouvés ont montré que l'apparition du pic associé à l'hydratation des constituants du laitier est accélérée à partir de 30°C, de même, la chaleur libérée par le ciment au laitier conservé sous une température élevée est plus importante que celle dégagée par le ciment ordinaire, indiquant que la réactivité du laitier est favorisée par les températures élevées.

b. Effet de la température de cure



a-BAPT b-BAPC



c- BAPL d- BAPP

Figure III.8. Résistance à la compression en fonction d'âge de chaque BAP conservé à différentes température.

L'effet de la température de cure en fonction de l'âge des différentes températures de cure est présenté par la figure III.8. Au jeune âge (3 jours),Tous les BAP ont marqué une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la température, ce gain est plus important du passage de 20 à 40°C qu'un passage de 40°C à 60 et 80°C, sauf pour les BAPL où l'augmentation est de 71%, 92% et 124% à 40°C, 60°C et 80°C

Une cure de 40°C a mené à une augmentation importante des résistances au jeune âge sans nuire la résistance à long terme, en effet l'augmentation est de 47,73%, 62,21%, 71% et 44,47% à 3jours et 12%, 5%, 12,89%, 0,54% à long terme respectivement pour les BAPT, BAPC, BAPL et BAPP.

La cure à 60°C est plus efficace à 3 et 7 jours qu'à 28 et 90 jours, en effet à 90jours les résistances des BAPT, BAPC, BAPL sont comparable à celles des mêmes bétons à une cure de 20°C et une chute de 8,2% es observé pour le BAPP

L'augmentation de la température de cure à 80°C s'avère inefficace à long terme où on a remarqué des diminutions de 3%, 8% et 15% de résistance pour les BAPT, BAPC, BAPP respectivement, et une résistance d'un BAPL très proche à celle du même BAP un 20°C

Des travaux faits par Tan et Gjorv **[158]** ont montré que l'effet de la température de cure sur la résistance à la compression exprimé en pourcentage de diminution, est plus petit dans le cas de BHP que dans le cas du béton usuel. Les résultats montrent que la résistance à la compression à 28 jours diminue de 11 %, 15 % et 23 % lorsque la température augmente de 20 à 50, 65 et 80 °C respectivement pour le béton usuel. Tandis qu'elle est de 2 %, 6 % et 7 % dans le cas de béton léger à haute performance. Les auteurs relient cela, au fait que, les grains de ciment sont tellement proches de façon que la quantité des hydrates formés dans la période initiale de murissement, sera suffisante pour remplir tous les espaces intergranulaires et Par conséquent, la diminution du taux d'hydratation dans la période qui suit, cause par l'augmentation de la température de murissement, n'affecte pas la résistance à long terme.

Les résultats de recherches de Ali **[139]** sur L'effet de la maturation accéléré sur la résistance à la compression des bétons autoplaçant avec une proportion de 20% de calcaire ont prouvée l'amélioration des résistances jusqu'à 28jours pour des températures de 60°C et 80°C, par contre à 56 jours, une diminution de 4% de la résistance est observé à 60°C, et une résistance équivalente à celle de 20°C est mesuré à 80°C.

Une autre étude faite par Derabla **[173]** sur l'effet d'un traitement de cure à 60°C des BAP contenant 20% de calcaire et des BAP avec 20% de laitier, il a prouvé pour le premier BAP, une augmentation importante de la résistance à jeune âge et moins importante à 28jours, même une faible diminution est observé à 180 jours, et pour le deuxième BAP une augmentation importante de la résistance à jeune âge qui disparaisse à long terme jusqu' avoir des résistance comparable à celle bu béton sans traitement thermique

Ramezanianpour **[137]** a appliqué deux températures de cure, une à 60°C et l'autre à 70°C sur des BAP contient 20% de calcaire, cette différence de 10°C n'a pas donnée ses récoltes, où son effet néfaste sur la résistance à 28 et 90 jours et plus apparent que son effet bénéfique à jeune âge, les résistances à 60°C sont 24,4 42,3 52,8 53,9MPa et à 70°C sont 25,4 43,2 48,5 50,7MPa respectivement à 3, 7, 28 et 90 jours.

Selon Rose **[212]** l'activité ou la variation de la résistance du béton contenant du laitier change en fonction de l'élévation de la température de cure ce qui conduit à une élévation de la résistance au jeune âge et à long terme.

Luke et Glasser **[213]** ont étudié des pâtes renfermant 30% de laitier à des températures allant de 25°C à 55°C, Ils ont observé que l'hydratation du laitier augmente systématiquement avec la température.

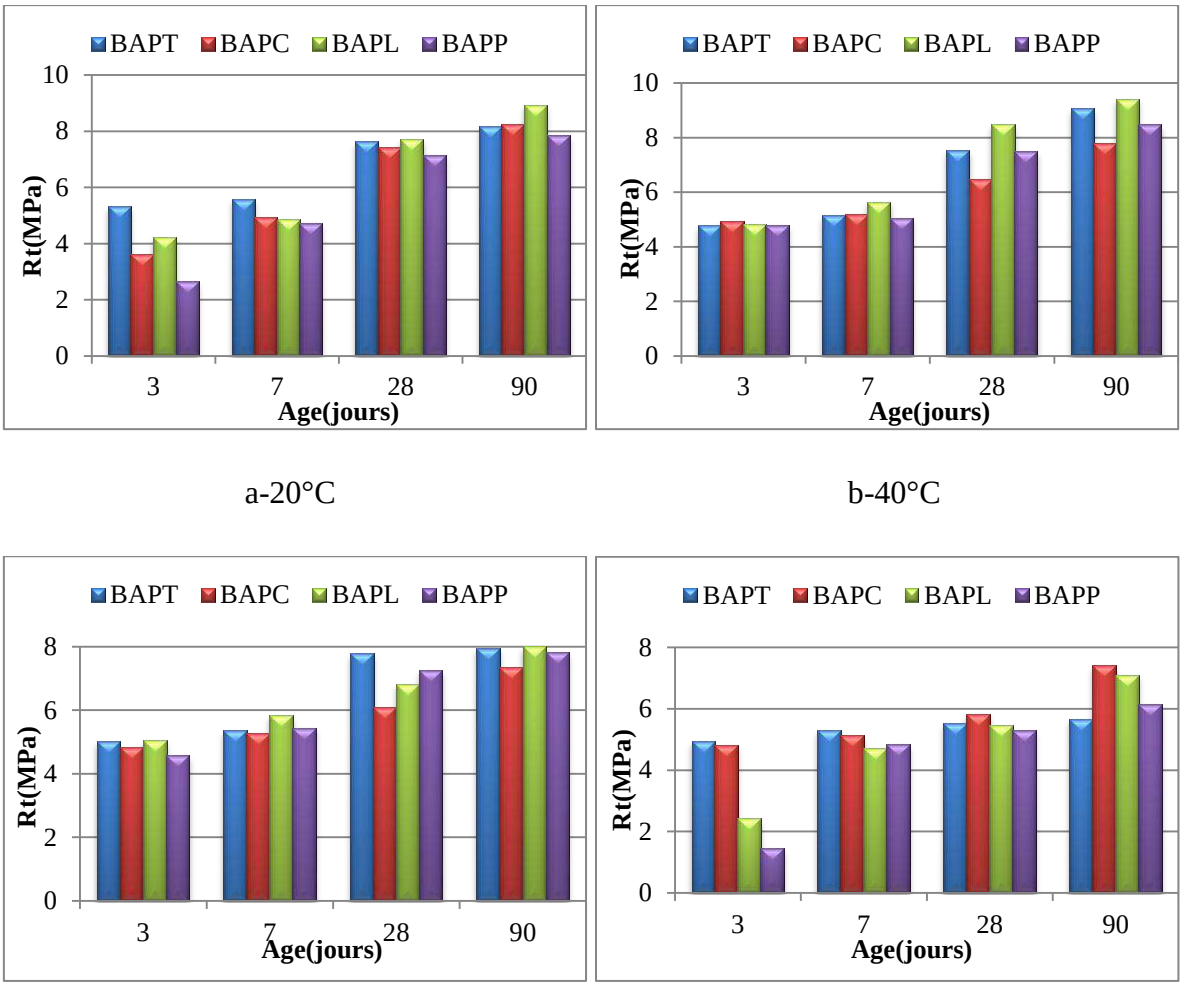
Kellouche **[130]** a conclu que l'effet de la température de cure est plus prononcé sur une pâte renfermant 50% de laitier que sur une pâte témoin sans laitier; une augmentation appréciable de la quantité d'eau non évaporable est constatée en élevant la température de cure de 20°C à 40°C et qui peut dépasser celle de la pâte témoin au-delà de 90 jours. Ce qui nous conduit à déduire que la température de cure de 40°C est la température la plus favorable pour l'hydratation des ciments au laitier et sur les résistances à la compression à 28jours.

Selon Charbel **[134]** l'augmentation de la température de cure de 20°C à 35°C a augmenté la résistance à 3 jour des BAP à haute performance contenant différents pourcentages de laitier où il a conclu que cette augmentation de température n'a pas affecté le processus d'hydratation, et la résistance à 56 jours a augmenté avec la température.

EZZIANE **[206]** a varié la température de cure entre 20,40 et 60°C sur les mortiers avec une substitution de 20% du ciment par la pouzzolane a une finesse similaire à celle du ciment , il a trouvé que Par rapport à une cure de 20°C, la cure à 40°C a augmenté la résistance à la compression par 22% à 3j cette augmentation diminue jusqu'à 7% à 7j par contre il a remarqué une faible diminution de résistance de 4 et3% à 28et90J respectivement, un même effet est remarqué pour une cure de 60°C mais plus apparent , à 3 et 7 jours on observe une augmentation de la résistance de 44 et 26% et à 28 et 90 jours une diminution de 6 et 13% .

III.4.2Résistance à la traction

a. Effet des additions



a-20°C b-40°C

c-60°C d-80°C

Figure III.9.Résistance à la traction en fonction d'âge des différents BAP pour température de cure**.**

La figure III.9, indique une évolution progressive de la résistance à la traction par flexion au cours du temps pour tous les BAP.

Les résultats obtenus à une cure de 20°C montrent l'effet négatif des additions minérales sur les résistances initiales des BAP. A trois (03) jours une diminution de l'ordre de 47%, 20% et 50% par rapport au BAPT a été observée pour BAPC, BAPL et BAPP respectivement. Cette diminution devient de 12%, 12% et 15% à l'âge de sept (07) jours et presque nul à l'âge de 28 jours, là où la figure montre presque une accordance entre les résistances des différents BAP. A l'âge de 90 jours la résistance de ces BAP rattrape ou dépasse celle du BAPT. En effet une

différence de l'ordre de 1 et 9% en termes de gain des BAPC et BAPL par rapport au BAPT respectivement avec une légère diminution a été observée pour le BAPP (4%).

L'augmentation de la température de cure à 40°C et 60°C améliore l'efficacité des additions à 3 et 7 jours, alors que des résistances comparables à celle du BAPT sont observées pour tous les BAP. A partir de 28jours, le BAPC et BAPP marque une diminution de la résistance, cette perte est plus importante pour les BAPC qu'un BAPP, contrairement au laitier qui a présenté le meilleur comportement à 40°C avec un gain de 12% et 4% à 28 et 90 jours respectivement.

L'efficacité du calcaire est bien définie à une cure de 80°C, des résistances comparables à celle du BAPT sont observés à 3 jours et 7 jours et une augmentation de 5% et 26% à 28 jours et 90 jours. A la même température des chutes considérables sont constatés au jeune âge équivaut à 51% et 71% pour les BAPL et BAPP respectivement, ces chutes de résistance diminue avec l'âge jusqu'à 90 jours où des gains de 36% et 8% sont remarqués pour les BAPL et BAPP.

Kanstad et al. **[155]**, ont étudié les propriétés mécaniques d'un béton de hautes performances contenant des additions minérales et muri sous différentes températures. Il a été constaté à travers cette étude, que les bétons de hautes performances sont moins sensibles aux effets négatifs des températures élevées. Notamment pour les bétons contenant de la pouzzolane, cendres volantes ou fumée de silice. En outre la réduction de la résistance à la traction sous l'élévation de la température est plus importante par rapport aux autres caractéristiques mécaniques.

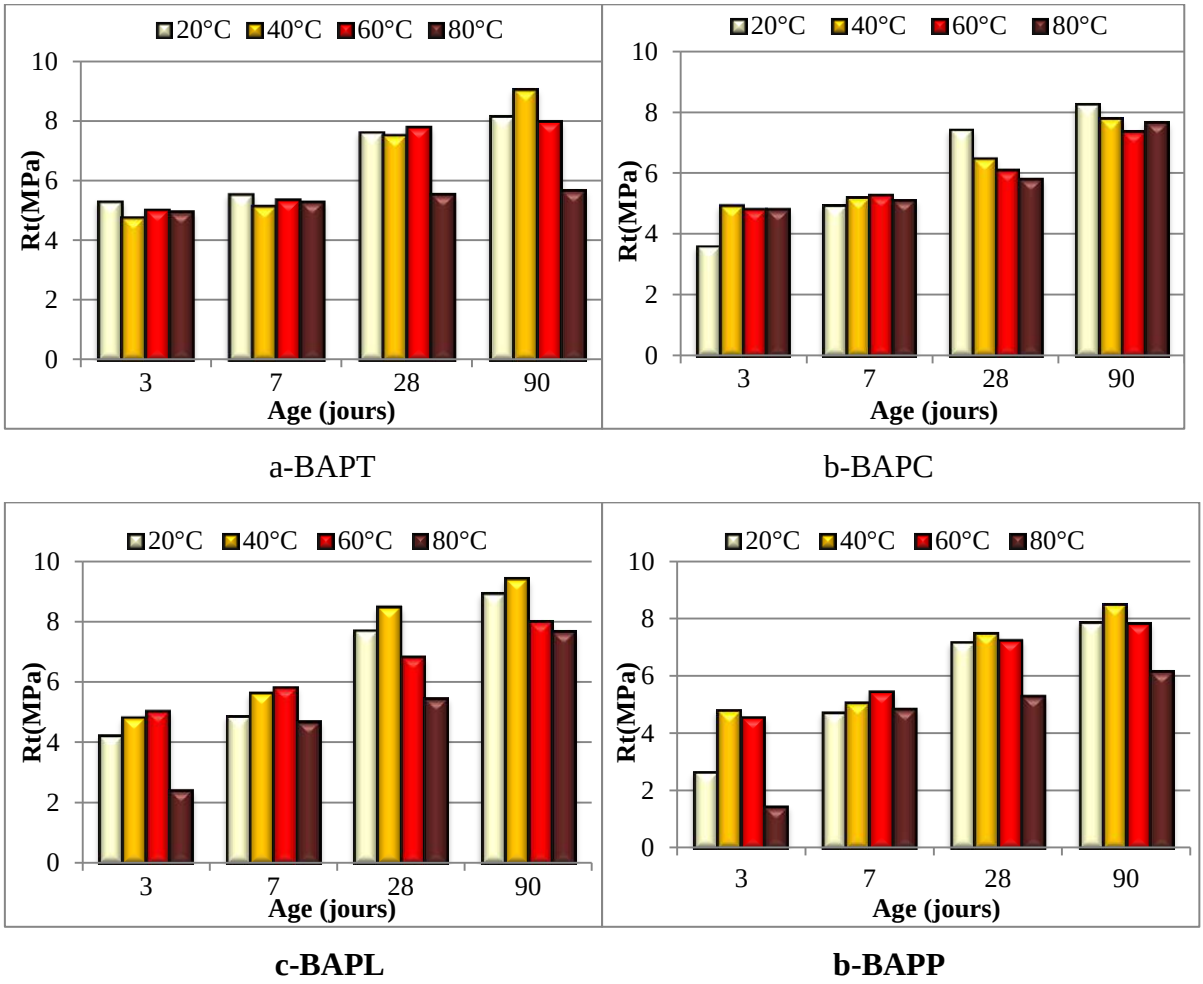
Les résultats trouvés par Hadj Sadouk **[207]** confirment que par rapport au mortier sans addition, une diminution de la résistance à la traction des mortiers contenant différent taux de calcaire (5, 10, 15 et 20%) dans les conditions de cure normales, pour un climat chaux, la diminution est observée qu'à partir de 7 jours.

Boukni **[162]** a montré que pour des températures de cure de 20, 40 et 60°C, une augmentation du taux du fillers calcaire mène à une augmentation de la résistance à la traction des bétons autoplaçant.

b. Effet de la température de cure

L'évolution de la résistance en traction par flexion en fonction de la température n'a pas été étudiée aussi souvent que celle de la résistance en compression, notamment pour le cas des bétons autoplaçants.

Les résultats de la résistance à la traction par flexion des différents BAP en fonction de l'âge et température de cure sont présentés à la figure III.10.



a-BAPT b-BAPC

c-BAPL b-BAPP

Figure III.10.Résistance à la traction en fonction de l'âge de chaque BAP conservés à différentes températures.

A l'issu de cette figure, on remarque que les BAPL et BAPP présentent un comportement presque similaire dans les échéances de l'essai en fonction de la température. On observe une augmentation de la résistance d'ordre de 14%, 16% pour les BAPL et 81%,72%pour les BAPP respectivement à 40 et 60°C par rapport à ceux de 20°C. Cette différence devient de 16%, 20% pour les BAPL et 7%, 15% pour les BAPP à sept (7) jours. A l'âge de 28 et 90 jours une amélioration dans la résistance de ces deux BAP conservés à 40°C a été observée

par rapport à 20°C par contre une diminution est clairement observée à 60 et 80°C pour les BAPL. Pour les BAPP, on remarque une ressemblance entre les résistances dans 20 et 60°C pour 28 et 90j.

Pour le cas des BAPT et BAPC, on observe qu'ils ont des comportements très différents aux différents âges en fonction de la température. Une amélioration des résistances en fonction de la température du BAPC par rapport à 20°C est remarquée à trois (3) jours, contre une légère diminution dans le cas de BAPT en même âge. Un comportement similaire est observé entre les deux BAP à sept (7) jours. A partir de 28 jours, l'élévation de la température, présente un effet négatif sur les résistances des BAP à base de calcaire. Par contre une amélioration de l'ordre de 11% a été remarque à 90 jours d'âge pour les BAPT à 40°C par rapport à 20°C.

A travers ces diverses constatations, on peut dire que comme dans le cas de la résistance à la compression, la température optimale qui garanties la meilleure résistance à la traction pour les BAP est celle de 40°C. Sauf pour les BAPC, là où la température de 20°C, restent la meilleure. Bien au contraire aux résultats trouvés par Boukni**[162]**, qui a démontré que les meilleures résistances des BAP à base de calcaire sans celles pour ceux conservés à 40°C. On note également de ces figures que le BAP à base de laitier reste toujours le BAP qui développe les meilleures résistances à long termes, quel que soit la température de cure.

L'étude de Shoukry et al. **[214]** a discuté le développement des caractéristiques mécaniques d'un béton ordinaire dans deux modes de murissement différents. Avec une température allant jusqu'à 55°C. Les résultats de cette étude indiquent que la résistance (compression et traction) du béton et le module d'élasticité sont inversement proportionnelles à la température.

Yazıcı et al. **[194]** ont étudié l'effet du traitement thermique sur les propriétés mécaniques d'un béton à base d'additions minérales (fumée de silice, cendre volantes et laitier granulé). Il a observé que l'application du traitement thermique fait diminuer la résistance à la flexion et la ténacité du béton par rapport au ce muris à 20°C. Toutefois l'emploi des additions tel que les CV et LG diminué cet effet négatif. Ce résultat est confirmé par les travaux de Kejin et Zhi **[215]**, qui ont prouvé que le risque de fissuration sous l'effet d'un traitement thermique, est plus faible dans le cas des bétons contenant des additions minérales.

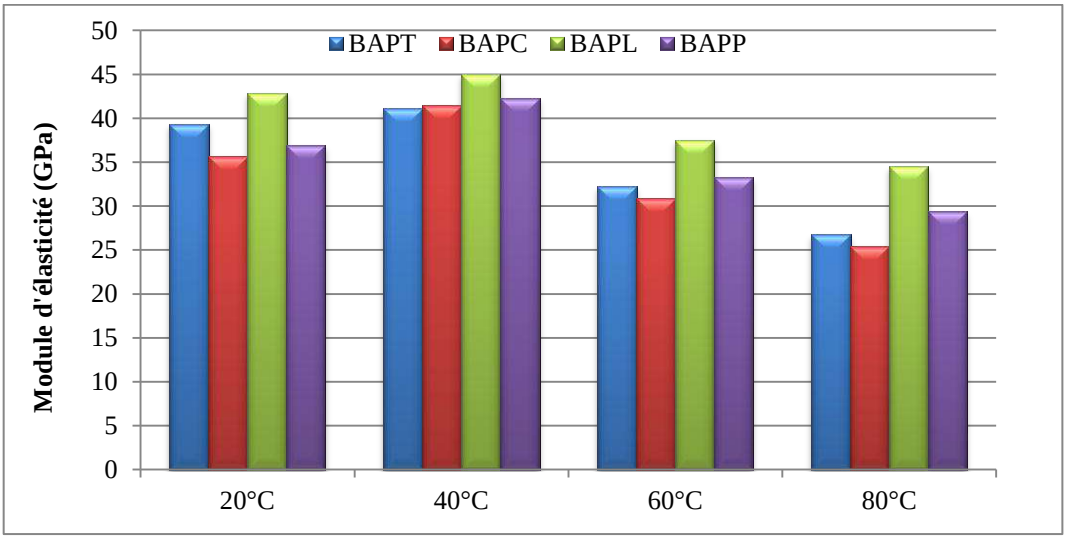
L'effet des cendres volantes sur les propriétés mécaniques d'un béton soumis au traitement thermique appliqué en préfabrication, fait l'objet de l'étude de Munday et al. **[216]**.Cette étude a montré que ces bétons présentent une résistance à la traction **v**is-à-vis de l'effet d'une

température élevée, cette étude a montré que ces bétons présentent une résistance à la traction similaire qu'un béton contenant un ciment portland.

III.4.3Module d'élasticité

Il s'agit du module tangent d'élasticité, déterminé à partir de la loi de comportement contrainte déformation du béton, la mesure est opérée sur extensomètre mesurant la déformation d'une éprouvette cylindrique 16x32 sollicitée en compression simple conformément au processus d'essai **[203]**.

a. Effet des additions



FigureIII.11. Module d'élasticité à 28jours en fonction de la température de cure.

Comme présenté dans la figureIII.11, La substitution du ciment par une addition minérale à un effet sur le module d'élasticité dépend du type d'ajout, Les valeurs à 20°C varient entre 35 et 42 GPa, en effet beaucoup de chercheurs **[213,217, 218]** ont trouvé une différence dans le module d'élasticité qui change entre 0 à 6 GPa à une température de 20° C,

L'efficacité du laitier augmente avec l'élévation de la température de cure, en effet par rapport au BAPT une augmentation de 8,96%, 9,54%, 16,31% et 29,03% à 20, 40,60 et 80°C. En effet le BAPL a les modules d'élasticité les plus élevés à chaque température de cure

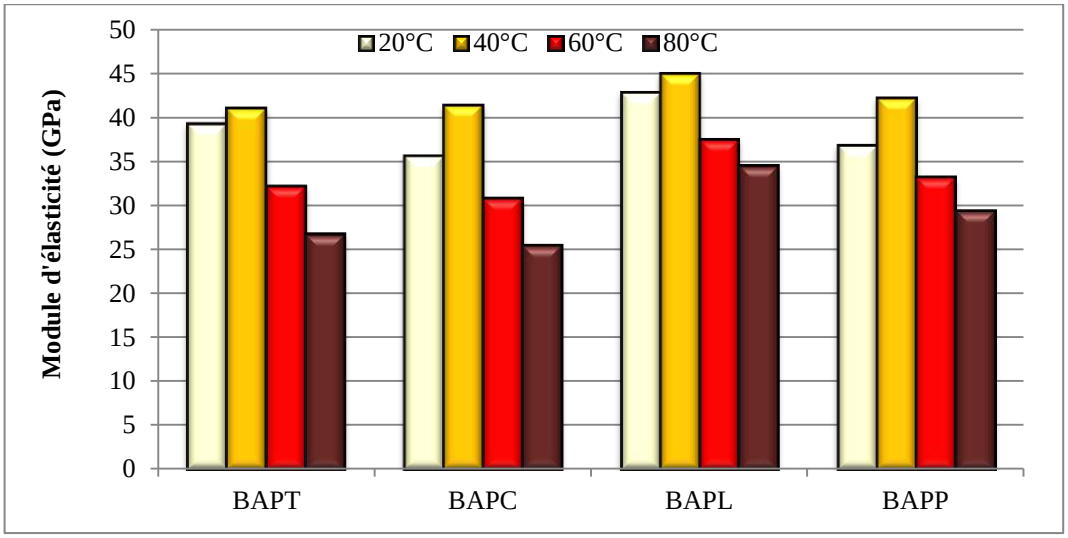
Comparant au BAPT, à 20°C une diminution de 9,28% et 6,28% est observé pour les BAPC et BAPP respectivement, au-delà de cette température le calcaire et la pouzzolane n'ont pas un effet significatif sur le module d'élasticité.

Avec une proportion de laitier de 50 et 75% Sutterheim **[219]** et Banforth **[220]** ont montré un module d'élasticité similaire ou légèrement supérieur que celui du béton avec CPA quand le béton est conçu à la même résistance de compression. Cette augmentation est due à la différence entre les produits d'hydratation du laitier et ceux du CPA. Pour une résistance donnée, les laitiers ont donc un module d'élasticité un peu plus élevé que celui du CPA **[217].**

Boukni **[162]** a montré que, l'accroissement du dosage en fillers calcaires dans un béton autoplaçant influence négativement sur l'évolution du module d'élasticité.

b. Effet de la température de cure

Le module d'élasticité des différent BAP à différentes températures est présenté dans la figure III.12.



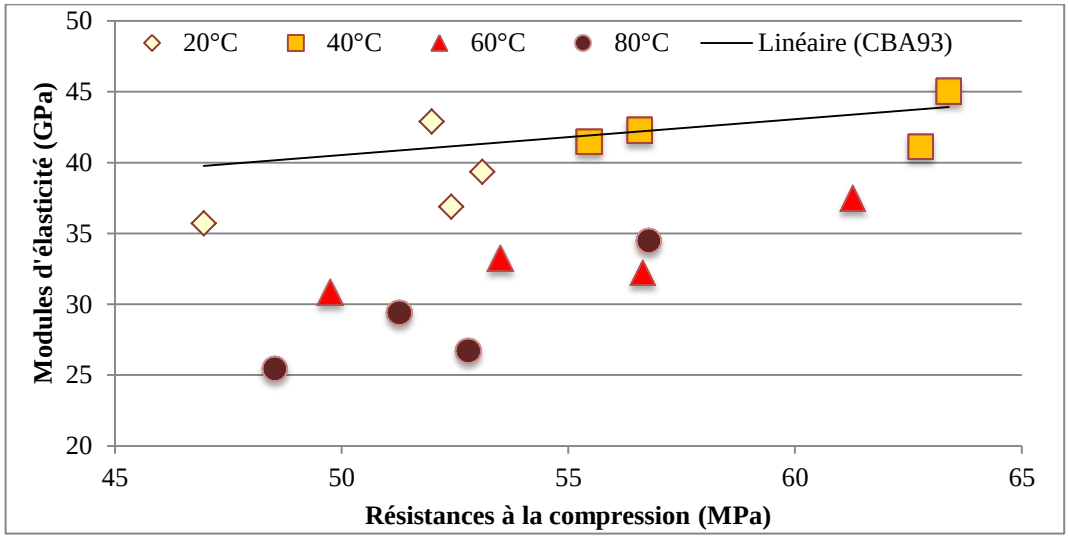
FigureIII.12. Module d'élasticité à 28jours en fonction de type d'addition

Comme présentée dans la figure III.12, l'augmentation de la température a un effet positif sur le module d'élasticité que pour une température de cure de 40°C, au-delà le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la température, et cela pour tous les mélanges. On peut affirmer qu'une cure à 40°C rapporte les meilleurs modules d'élasticité.

Boukni **[162]** dans ses travaux a trouvé que, les modules d'élasticité des éprouvettes conservées à 20 °C sont toujours supérieurs à ceux des éprouvettes recevant un étuvage quel que soit la température du mûrissement, et que cette diminution est plus importante lorsque la température passe du 40 à 60°C que du 20 à 40°C. Les résultats de Reinhardt **[221]** sur des bétons autoplaçants suivent une évolution similaire à nos résultats, à savoir une diminution du module d'élasticité, à la suite d'un mûrissement sous température de 60 °C.

c. Relation entre module d'élasticité et résistance à la compression

La figure III.13 présente la relation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité des BAP à différentes températures de cure.



FigureIII.13. relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression à 28 jours.

Selon le CBA93, sous des contraintes normales d'une durée d'application inferieure à 24heures, on admet à défaut de mesures, qu'à l'âge de j jours, le module de déformation longitudinale instantanée du béton E_{ij} est égale à la racine cubique de sa résistance à la compression par un coefficient K qui égale à 11000. Les valeurs à 20 et 40°C sont proche à la linéaire du CBA93 avec des valeurs de K varie entre 9800 et 11500 à 20°C, 10300 et 11300 à 40°C.Au-delà de ces températures les valeurs s'éloigne de la linéaire et le coefficient K devient varie entre 8400 et 9517 à 60°C, 6950 et 9000 à 80°C.

III.4.4Vitesse ultrasonique

Les valeurs des vitesses de propagations des ondes de tous les mélanges à différentes températures de cure sont affichées sur le tableau III.3.D'après les résultats obtenus, on remarque que la vitesse ultrasonique dans toutes les compositions de béton est d'autant plus grande que ce dernier est plus âgé, et que l'augmentation s'est ralenti après les 28jours ce qui est en corrélation avec l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

TableauIII.3. Vitesse ultrasonique des différents BAP à différentes températures de cure en fonction de l'âge (m/s).

T (°C)	Désignation	Age (jours)			
		3	7	28	90
20	BAPT20	4090	4362	4622	4666
	BAPC20	4036	4400	4552	4653
	BAPL20	4098	4415	4630	4700
	BAPP20	4107	4386	4545	4676
40	BAPT40	4454	4678	4819	4878
	BAPC40	4386	4640	4784	4805
	BAPL40	4410	4651	4819	4901
	BAPP40	4420	4545	4700	4825
60	BAPT60	4202	4454	4816	4872
	BAPC60	4301	4429	4728	4728
	BAPL60	4306	4543	4835	4900
	BAPP60	4012	4338	4690	4806
80	BAPT80	4242	4640	4785	4820
	BAPC80	4237	4561	4689	4800
	BAPL80	4582	4657	4723	4884
	BAPP80	4348	4510	4566	4779

Whitehurst **[222]** a classifié les bétons selon leur qualité comme suit : excellente, bonne, modérée, mauvaise et très mauvaise pour des Vitesses de 4500 et plus, 3500÷4500,3000÷3500, 2000÷3000 et ≤2000 m/s. A partir de cette classification on peut affirmer que toutes les compositions testées sont d'excellentes qualités.

a. Effet des additions

Des vitesses inferieurs à celles bu BAPT sont mesurées pour les BAPC à toutes les échéances sauf AU jeune âge pour des températures de cure de 60°C, en effet le même comportement est observé pour les résistances à la compression. La diminution est aussi apparue dans le cas des BAPP à des températures de cure supérieureS à 20°C, et cela pour tous les âges d'essai.

Des valeurs comparables à celle du BAPT avec une légère augmentation des vitesses de propagation des ondes sont constatées pour les BAPL à toutes les températures de cure, en effet le BAPL a donné les meilleures vitesses à long terme, ce qui est en corrélation avec la résistance à la compression.

Ibrahim Türkmen **[223]** et Mucteba **[224]** ont remarqué que la vitesse des BAPL est supérieure à celles du BAP de référence à partir de 28jours, pour des taux de 10 et 20% de laitier. Le calcaire a donné les vitesses les plus faibles à jeune âge et à long terme, des résultats similaires sont trouvées par Mucteba **[224]** pour une incorporation de 20% de calcaire.

b. Effet de la température

L'augmentation de la température provoque une augmentation de la vitesse quel que soit le type d'addition, sauf pour le BAPP qui a révélé au jeune âge des valeurs à 60°C et 80°C inferieurs à celles du même béton à 20°C.

Il est à noter que les plus grandes vitesses de propagation des ondes sont mesurées sur les échantillons conservé à 40°C pour les quatre types du béton à tous les âges d'essai.

Contrairement au béton autoplaçant, pour les bétons ordinaires, Abbasi **[164]** a signalé une diminution de la vitesse avec l'augmentation de la température, et cela indique l'effet nuisible de la cure chaude sur la qualité de ces bétons.

Gesoğlu **[165]** a montré qu'a 1 jour les bétons traités thermiquement avaient des valeurs de vitesses de propagation des ondes (VPO) légèrement supérieures au béton durci dans les conditions normales, et à partir de 7 jours il n'y avait aucune différence remarquable dans les valeurs VPO des bétons.

Il est a signalé que peu de recherches sont faites sur l'effet de la température de cure sur la vitesse de propagation des ondes des bétons autoplaçants.

c. Relation entre la vitesse de propagations des ondes et la résistance à la compression

Selon Tharmaratram et al. **[225]**, le meilleur modèle mathématique reliant la résistance à la compression et la vitesse d'onde ultrasonore des bétons courants est de forme exponentielle

$$f_c = ae^{bv}$$ Equation 3.1

Où fc : la résistance à la compression en MPa ;

V : vitesse d'onde ultrasonore en m/s;

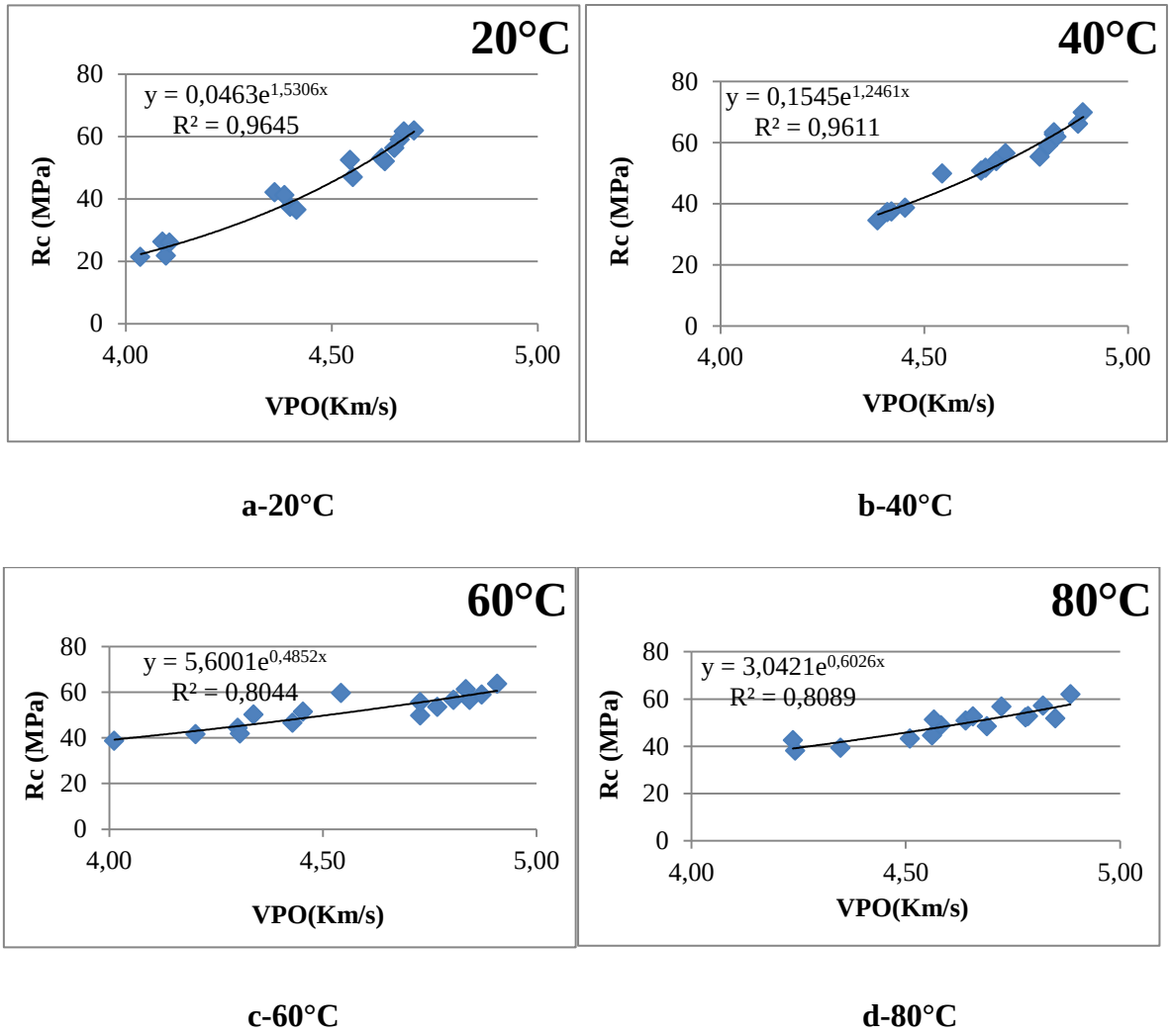
a et b : sont des constantes.

Le même modèle est approprié aux BAP contenant des cendres volantes **[226]**, la fumée de silice et la poudre de marbre **[23]** avec différentes constantes, respectivement les équations et les coefficients de détermination sont :

$f_c = 0{,}0015e^{2{,}1121v}$, R^2= 0,88 Equation 3.2

$f_c = 0{,}0031e^{2{,}0714v}$, R^2= 0,74 Equation 3.3

$f_c = 0{,}0681e^{0{,}0014v}$, R^2= 0,97 Equation 3.4



a-20°C **b-40°C**

c-60°C **d-80°C**

Figure III.14. Corrélation entre les résistances à la compression et les vitesses de propagation des ondes pour chaque température.

La figure III.14 présente une corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation d'ondes des différents BAP à chaque température de cure, Négligeant le type d'addition, Même avec une augmentation de la température on trouve une bonne corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation des ondes ultrasonique, d'un modèle exponentielle, on remarque qu'à 20 et 40°C le coefficient de correction est de l'ordre de 0,9 qui diminue à 0,8 pour 60 et 80°C, donc une température plus de 40°C peut affaiblir cette corrélation.

Il est a noté que la vitesse de propagation des ondes permet d'évaluer non seulement la qualité du béton (homogénéité, la présence des fissures et vides) mais de déterminer aussi la résistance à la compression d'une structure existante sans avoir recours à des essais qui peuvent affaiblir l'élément en béton tel que le carottage.

III.4.5 Bilan

À la lumière des résultats obtenus au cours de cette étude, plusieurs enseignements peuvent être faits.

D'après les résultats précédents on s'aperçoit que l'effet néfaste de la diminution de la quantité de ciment ne peut être compensé par l'addition calcaire quelque soit la température de cure, En effet le calcaire a réduit tous les performances mécaniques étudies. Sauf une accélération d'hydratation des BAPC sont révélée à 60 et 80°C pour avoir des résistances similaires à celles du BAP sans additions, donc on note que l'utilisation de l'addition calcaire peut être justifiée que par des considérations économiques et écologiques particulières.

La réactivité lente de laitier qui lui donne un effet d'un retardateur de prise peut être accélérer par une augmentation de la température de cure. L'efficacité du laitier est plus importante et se présente à un âge précoce plus la température de cure est élevée. Ce béton a présenté les meilleures valeurs finales de la résistance à la traction, vitesse de propagation et le module d'élasticité à toutes les températures de cure.

Le Laitier est l'addition le plus efficace à des températures de cure élevées, contrairement à la pouzzolane naturelle qui est la meilleure addition pour substitué le ciment à 20°C, mais la plus affecté par les températures élevées. Donc il s'avère inefficace en terme de résistance d'utiliser cette addition au-delà de 20°C.

La résistance à la compression au jeune âge augmente proportionnellement avec la température de cure, cette augmentation est plus importante pour les BAP contenant du laitier ou calcaire que pour les BAP avec pouzzolane ou sans additions.

Une température de cure de 40°C est jugé optimale pour tous les BAP pour les raisons suivantes :

- une augmentation importante de la résistance à la compression au jeune âge sans nuire aux résistances jusqu'à 90jours.
- Les meilleures résistances à la traction à long terme sont observées à cette température.
- Une augmentation du module d'élasticité à 28jours, et la vitesse de propagation des ondes à tous les échéances.

III.5Effet des additions et de la température de cure sur la durabilité.

III.5.1 porosité accessible à l'eau

La durabilité des bétons dépend beaucoup de la porosité, cette dernière conditionne l'intensité des interactions du béton avec les agents agressifs. Les pores à l'intérieur de l'ouvrage facilitent le processus d'endommagement, lequel s'initie généralement en surface.

a. Effet des additions

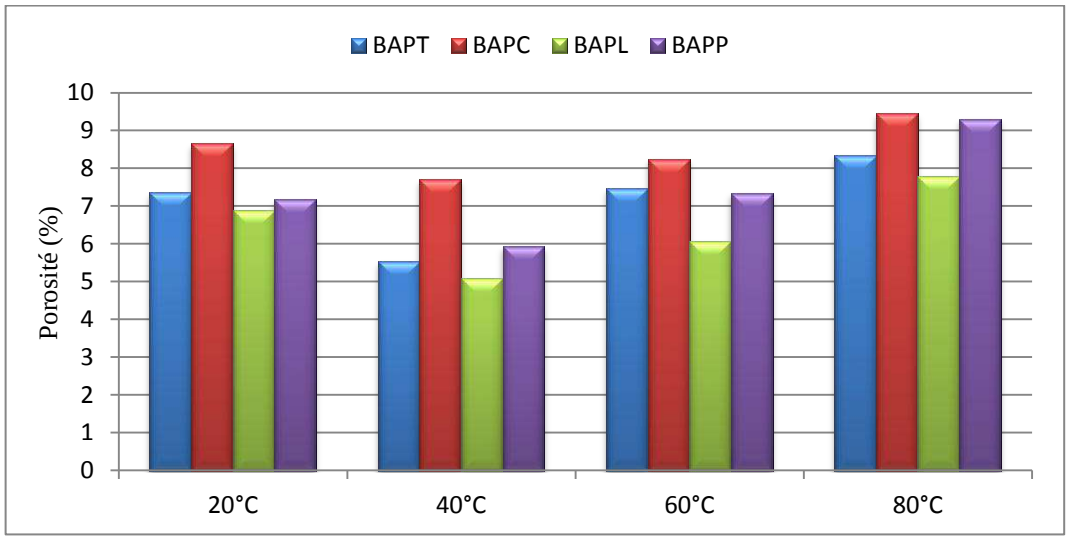


Figure III.15. Porosité accessible à l'eau à 28 jours en fonction du type d'addition.

En ce qui concerne l'effet des additions sur la porosité des BAP, la figure III.15 montre clairement que les BAP à base de calcaire, sont les bétons les plus poreux comparativement aux autres bétons et cela pour toutes les températures de cures, L'augmentation de la porosité par rapport au BAPT à une même température est 17,53%, 38,99%, 10,59% et 13, 31%à 20, 40,60 et 80°C respectivement, alors la plus faible différence a été observée à 60°C.

Une augmentation de la porosité est aussi observée par les BAPP à partir de 40°C, par contre à 20°C la porosité des BAPP est plus faible qu'un BAPT à une même température de cure.

Les BAP contenant du laitier, sont les moins poreux et ceci quelque soit la température de murissement. Une diminution par rapport au BAPT est de 6,39%, 34,03%, 26,55% et 17,57% respectivement à 20, 40,60 et 80°C et cela peut être dû à la production d'autres hydrates (CSH) qui comblent les vides et améliorent la microstructure.

Derabla**[173]** dans ses travaux a démontré que l'incorporation des additions (FC et LG) dans le BAP a raison de 20% du poids du ciment, fait augmenter légèrement la porosité de ce dernier lorsqu'il subit un traitement thermique à 60°C. L'auteur a trouvé également que l'augmentation du dosage en addition, engendre une augmentation dans la porosité des BAP à 60°C.

Ho et Cao **[227]**ont rapporté qu' une meilleure qualité en terme de porosité a été observée dans les bétons contenant 20% de cendres volantes et traité thermiquement par rapport aux mêmes bétons muris dans les conditions normales (20°C). Des résultats similaires ont été obtenus sur des mélanges contenant 35% de laitier de haut fourneau **[228]**.

Gallucci et al. **[160]** ont quantifié, par analyse d'images obtenues en microscopie électronique à balayage à partir de sections polies de béton, la porosité capillaire en fonction de la température de mûrissement. Les auteurs ont remarqué à très jeune âge, plus la température est basse, plus la porosité est élevée, ce qui s'explique par une cinétique lente de l'hydratation. Très rapidement, ils ont observé une inversion des tendances avec des porosités d'autant plus fortes que la température augmente. Le fait que ces auteurs ne trouvent pas de relation directe entre le taux d'hydratation et la porosité confirme que la température agit sur la répartition des hydrates plutôt que sur leur quantité.

b. Effet de la température de cure

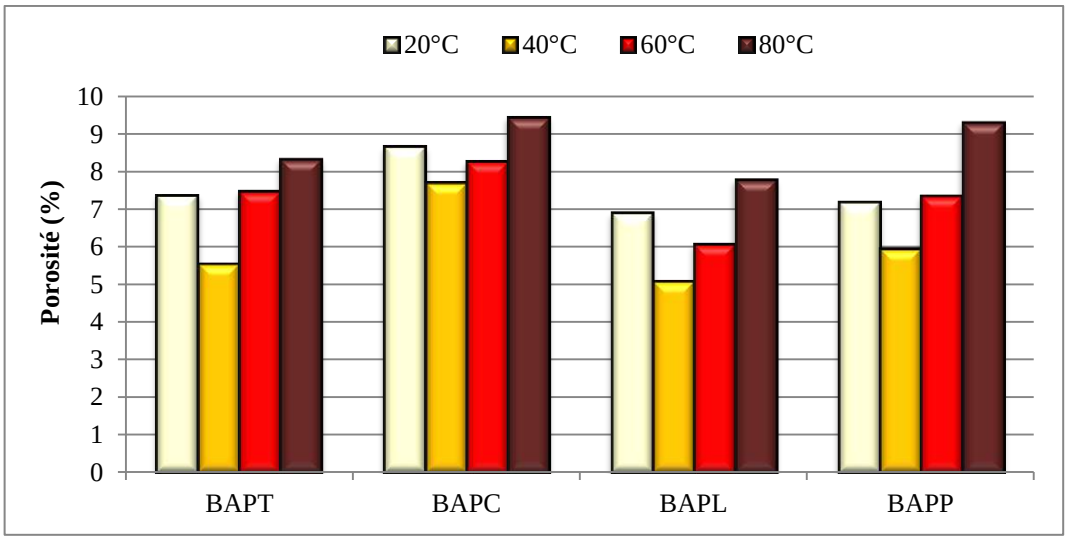


Figure III.16. Porosité accessible à l'eau à 28 jours en fonction du type d'addition.

Les résultats de la porosité accessible à l'eau obtenus à différentes températures de cure à l'âge de 28 jours et en fonction du type de béton sont présentés sur la figure III.16.

A l'issu de cette figure on remarque que les BAP conservés à 40°C présentent les plus faibles porosités et ceci quel que soit le type d'addition employée. En outre et à partir de 60°C, la porosité devient plus élevée plus on augmente la température de cure, de sorte que les valeurs les plus importante de la porosité sont mesuré à 80°C.

En effet comparons au même type de béton à 20°C, une diminution de 24,73%, 10,98%, 26,27% et 17,27% est révélé pour les BAPT, BAPC, BAPL et BAPP à 40°C respectivement, par contre à 80°C, la porosité de ces BAP est supérieur de celle des même BAP à 20°C par, 13,32%, 9,25%, 13,06% et 29,67%.

Aucune influence est constatée sur la porosité des BAP dans le cas du passage d'une cure de 20°C à une cure de 60°C sauf dans le cas des BAPL où une diminution de 12% est révélée.

Mouret et al. **[229]** ont montré que la conservation des éprouvettes de contrôle à 35°C durant 5 heures n'induit pas une augmentation de la porosité accessible à l'eau à 28 jours, quelles que soient la classe de résistance étudiée (22MPa, 35MPa) et la nature granulaire (siliceux ou calcaire poreux).

Reinhardt et Stegmaier **[221]** ont étudié l'influence de la température sur la porosité (mesurée par intrusion au mercure) de BAP à maturité équivalente à 3 jours de cure isotherme à 20°C. Ils ont constaté que l'élévation de la température ne modifie pas significativement la porosité totale mais qu'elle agit sur la répartition des pores en augmentant la quantité des petites tailles de pores capillaires (au voisinage de 0,1μm).

c. Relation entre la porosité et la résistance à la compression

La porosité peut être directement liée à la résistance mécanique en compression, en effet, la figure III.17 présente les valeurs de porosité accessible à l'eau des BAP en fonction des valeurs de résistance en compression à 28 jours. Les porosités sont bien corrélées aux résistances mécaniques, ce qui confirme la tendance évoquée par plusieurs auteurs **[54, 53, 93,230]**.

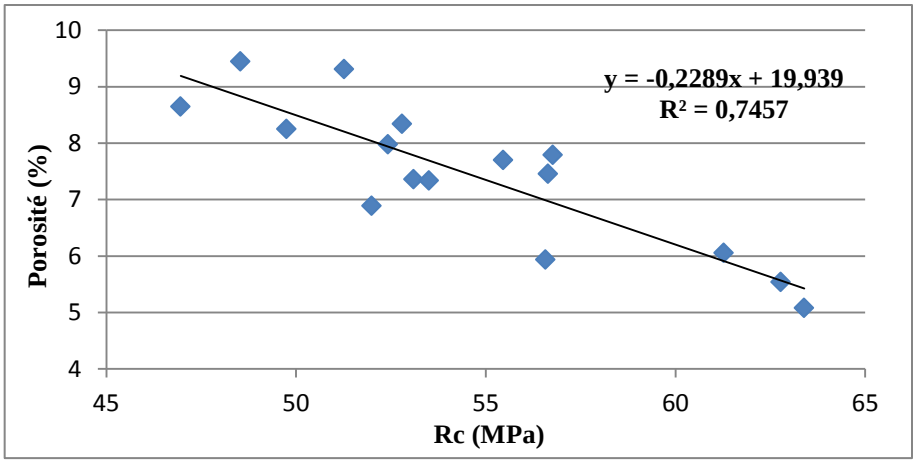


Figure III.17. Relation entre la porosité ouverte et la résistance en compression de tous les BAP mesurées à 28 jours.

III.5.2 Absorption d'eau par capillarité

Les résultats de l'absorption capillaire à 24 heures et ceux de l'absorptivité de tous les bétons à différentes températures de cure sont reportés dans le tableau III.5.

Tableau III.4. Caractéristiques relatives à l'absorption capillaire des BAP à l'âge de 28 jours.

Température de cure (°C)		**20**	**40**	**60**	**80**
BAPT	**Ca (kg/m^2)**	1.91	1.08	1.55	2.18
	S (m/h^{0,5})	0.32	0.15	0.25	0.37
BAPC	**Ca (kg/m^2)**	2.47	1.83	2.32	2.85
	S (m/h^{0,5})	0.44	0.34	0.41	0.48
BAPL	**Ca (kg/m^2)**	1.46	0.80	1.16	1.98
	S (m/h^{0,5})	0.24	0.15	0.19	0.34
BAPP	**Ca (kg/m^2)**	1.66	1.41	1.83	2.50
	S (m/h^{0,5})	0.28	0.24	0.31	0.42

Il est à noter que le coefficient d'absorption caractérise la capacité d'absorption d'un béton dans le temps. Plus le réseau poreux est fin, plus la cinétique d'absorption et par conséquent le coefficient d'absorption sont faible. En outre, la sorptivité désigne la vitesse d'absorption par remontée capillaire. Elle est étroitement liée au développement de la microstructure de la phase liante du matériau cimentaire et par conséquent, elle est influencée par la nature de l'addition et le mode de murissement.

a. Effet des additions

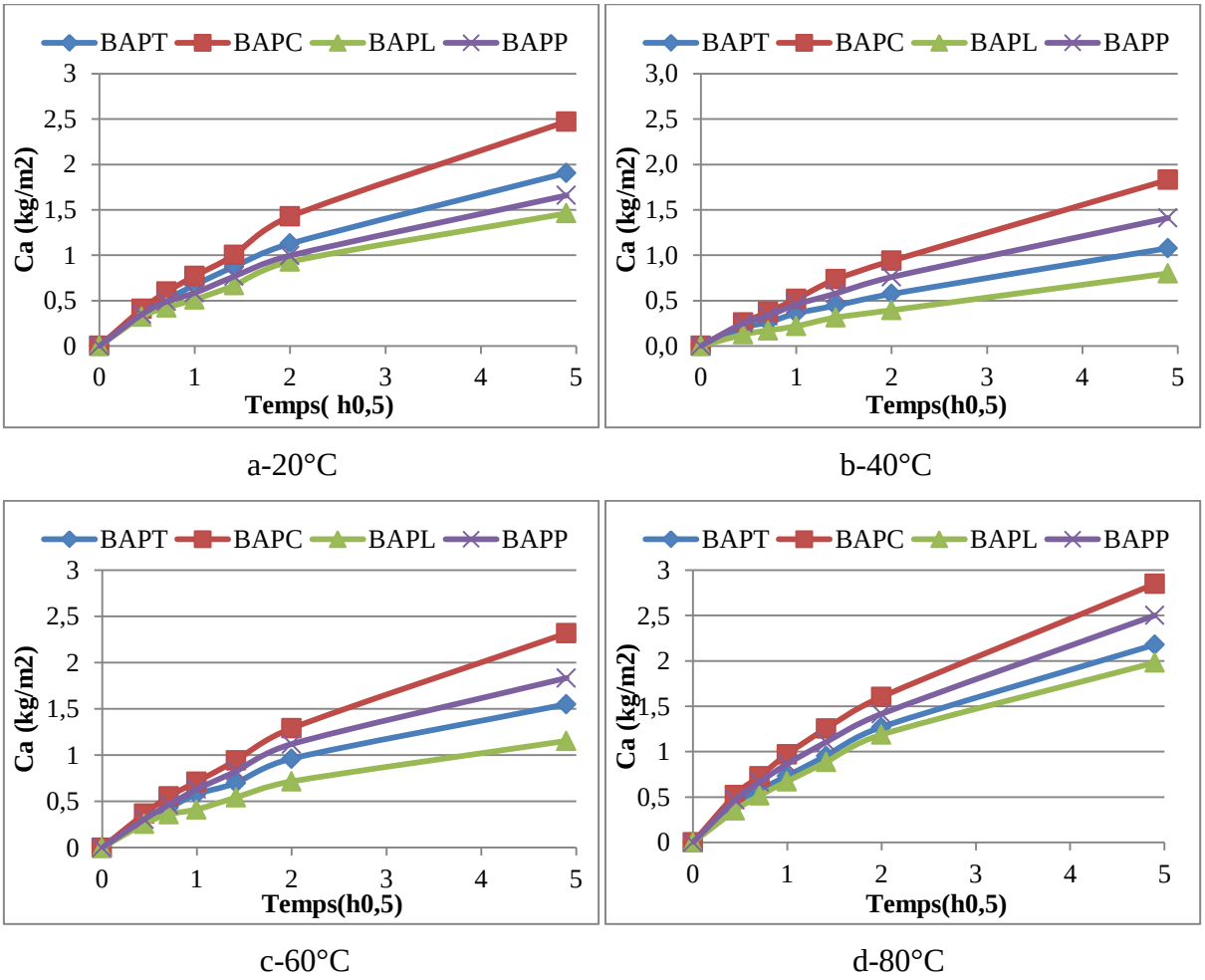


Figure III.18. Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours des différents BAP à chaque température de cure.

Les résultats de la mesure des coefficients d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps, des BAP après une cure humide de 28 jours à 20, 40, 60 et 80°C, sont présentés à la figure III.18.A l'issu de cette figure, on remarque qu'à chaque température de cure, les courbes reliant le coefficient d'absorption à la racine carré du temps des différents BAP suivent la même allure. Toutefois les BAP à base de laitier restent toujours les moins absorbant et les BAP à base de calcaire les plus absorbant pour toutes les températures de cure. On observe que les BAP à base de pouzzolane, devient plus absorbant que le BAPT toute en augmentant la température plus de 20°C.

L'étude de la sorptivité est nécessaire pour avoir une idée sur la vitesse d'absorption et même sur la taille des pores. D'après Bessa **[87]**, plus les pores sont plus gros, plus la pente de la droite est élevée. Ce qui traduit par une sportivité plus élevée.

La variation des valeurs de sorptivité des différents BAP à l'âge de 28 jours en fonction de la température de murissement, est présentée à la figure III.19 suivante.

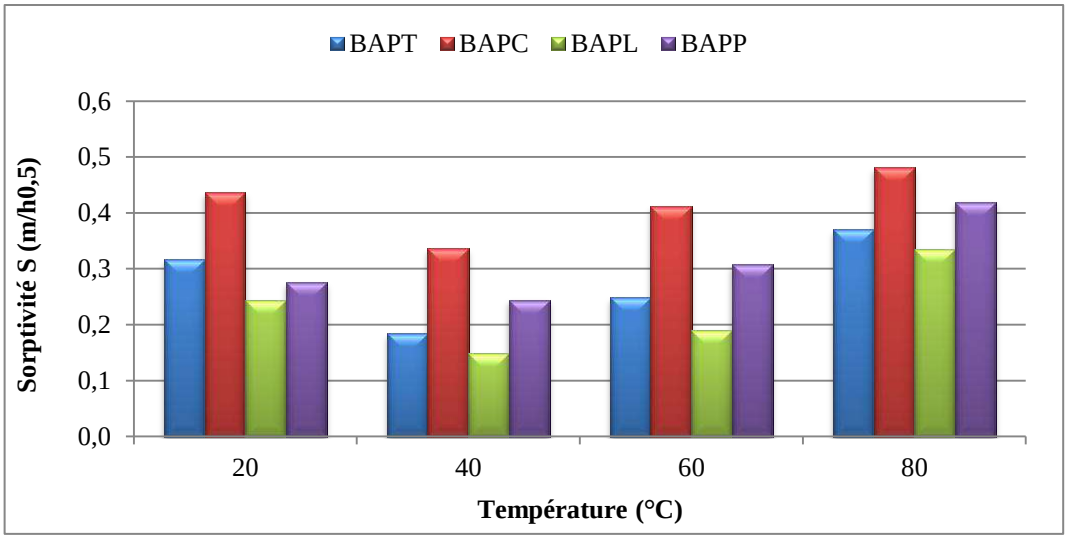


Figure III.19. Sorptivité à l'âge de 28 jours en fonction des températures de cure.

Pour toutes les températures de murissement, on remarque de cette figure que les BAP à base de calcaire présentent une sorptivité relativement plus importante par rapport à celle du BAPT. La différence est de l'ordre de 37,85%, 82,67%, 65,13% et 29,76% à 20, 40 60 et 80°C respectivement.

Pour des températures supérieures à 20°C, l'effet pouzzolanique de la pouzzolane naturelle, n'a pas compensé l'effet négatif des hautes températures. A cet effet une augmentation de sorptivité de 32,67%, 23,74% et 13,12% a été observée par rapport au BAPT à 40, 60 et 80°C respectivement. Toutefois à 20°C, cette absorptivité reste acceptable et inférieure par rapport au BAPT à 20°C.

Comme dans l'essai de porosité accessible à l'eau, les BAP à base du laitier granulé ont développés les meilleures performances comparativement aux autres BAP vis à vis leurs sorptivités. En effet une diminution de l'ordre de 23,12%, 19,03%, 23,74% et 9,59% par rapport au BAPT a été remarquée à 20, 40, 60 et 80°C respectivement. En outre, ces BAP présentent une structure plus dense à celle d'un BAPT conservé à 20°C,

Ho et al. **[228]** ont étudié l'effet des additions minérales (cendres volantes, laitier granulé et fumée de silice) sur le comportement d'un béton traité thermiquement à 55°C. Il est démontré dans cette étude que les bétons muris à 55°C, sont plus poreux à ceux conservés à 27°C. En outre, les auteurs trouvent que l'incorporation du laitier et fumée de silice améliore les performances du béton en terme de résistance et sportivité. Les mêmes conclusions ont été apportées par Gesoğlu **[165]** sur l'effet de fumées de silice et métakaolin sur la sorptivité des BAP traités à 70°C.

b. Effet de la température de cure

Les résultats de la mesure des coefficients d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps après une cure humide de 28 jours des BAPT, BAPC, BAPL et BAPP à toutes les températures de cure sont présentés aux figures III.20.

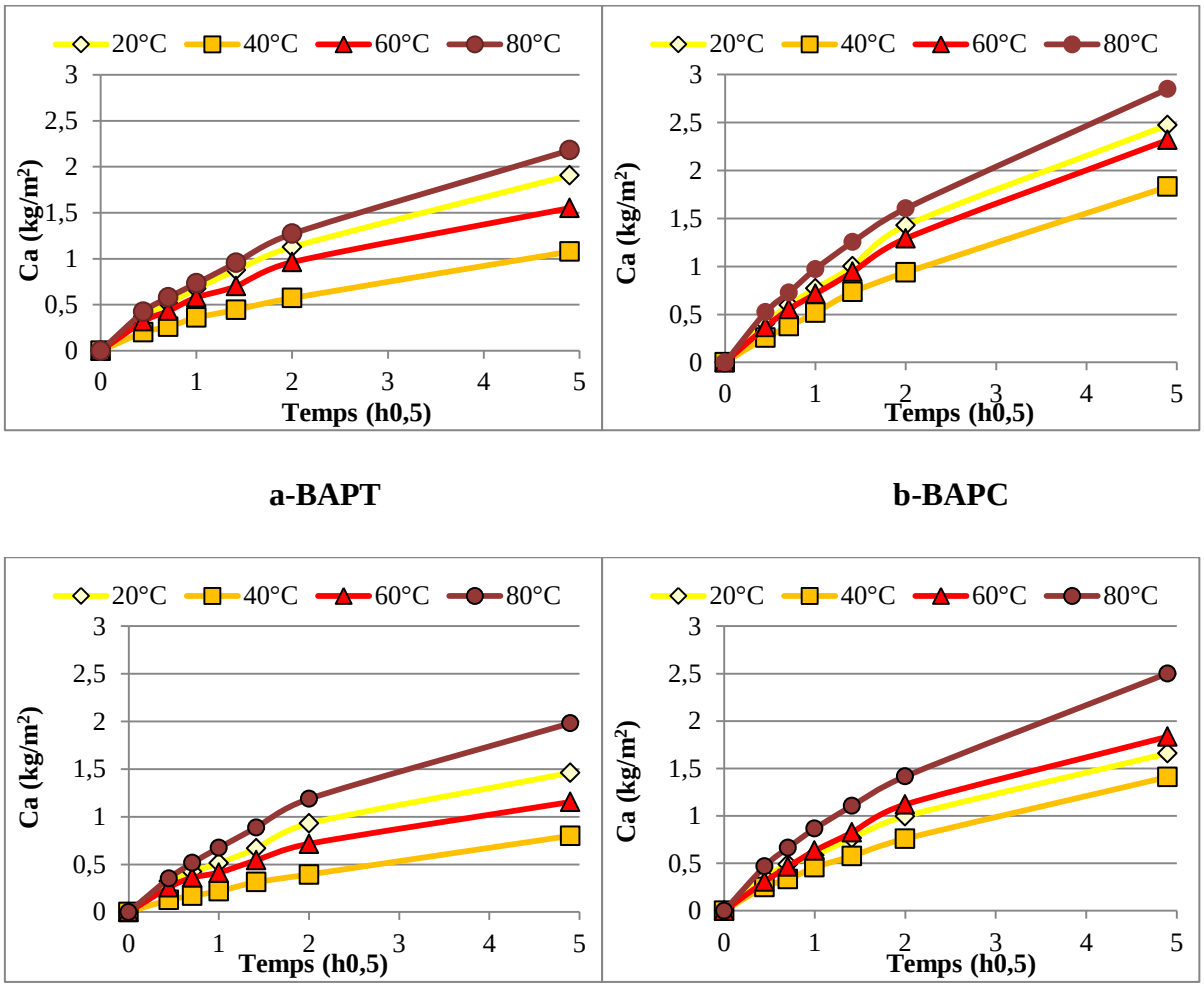


Figure III.20. Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours de chaque BAP à différentes températures de cure.

Il apparut clairement de ces figures, que quel que soit le type d'addition employé, les BAP conservés à 40°C sont les moins absorbants par rapport aux autres températures. Au-delà de cette température, on remarque que plus on augmente la température de cure, plus l'absorption devient plus élevée, néanmoins l'absorption à 60°C reste inférieur à celle de 20°C pour les BAPT, BAPC et BAPL. Il est à noter que les valeurs d'absorption les plus élevés sont constaté à 80°C, et que l'augmentation de l'absorption à cette température est plus importante pour les BAPP et BAPL que pour les BAPT et BAPC.

La variation des valeurs de sorptivité de chaque type de béton à l'âge de 28 jours en fonction de la température de murissement, est présentée à la figure III.21 suivante.

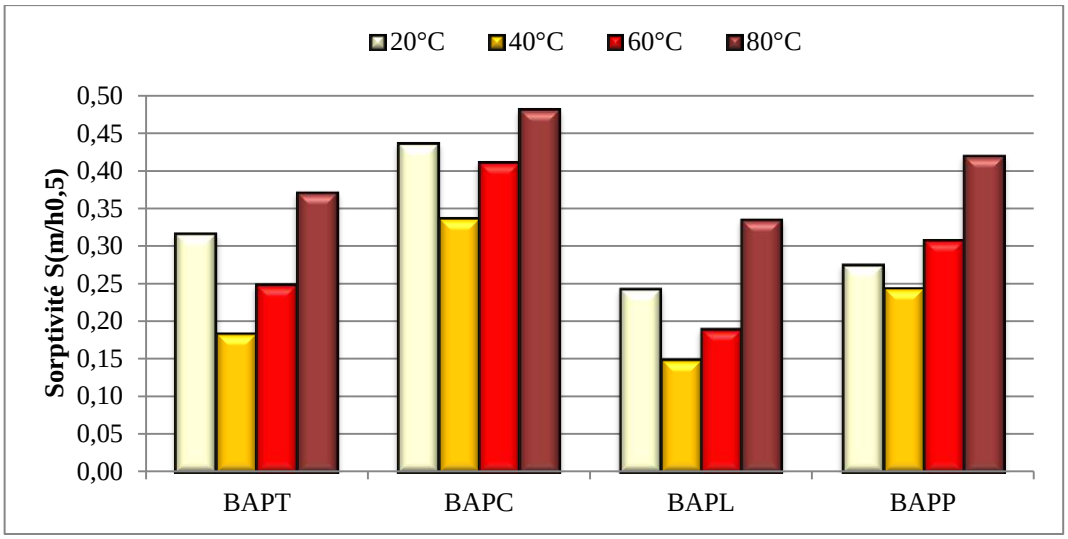


Figure III.21. Sorptivité à l'âge de 28 jours en fonction de type de BAP.

Tous les BAP étudies ont la plus faible sorptivité à une température de murissement de 40°, ces valeurs augmentes avec la température de cure, mais reste la sorptivité des BAP à 60°C inferieur à celles des même BAP à 20°C sauf pour les BAP à base de la pouzzolane ; par contre les valeurs de la sorptivité à 80°C sont les plus important.

Reinhardt et al. **[221]** ont étudié l'influence du traitement thermique sur la distribution de la taille des pores et de la résistance à la compression de différents BAP. Il est démontré à travers cette étude que l'augmentation de la température de cure, conduit à un changement dans la distribution de taille des pores à des pores plus grossiers sans augmenter le volume total des pores dans le béton.

Ramezanianpour et al. **[137]** ont étudié l'effet de deux températures de cure (60 et 70°C) sur le comportement mécanique et la durabilité d'un béton autoplaçant à base de calcaire. Sur la base de l'essai d'absorption d'eau par capillarité, l'étude a montré que l'application d'une température de 70°C a un effet négatif sur la durabilité du BAP par rapport au 60°C. En effet les auteurs ont expliqué ca par la formation rapide du gel de C-S-H et CH qui conduit à une structure hétérogène avec une porosité plus grossier.

L'effet d'un traitement thermique sur la sorptivité d'un béton ordinaire, fait l'objet de l'étude de Ho **[228]**.L'auteur a montré à travers cette étude qu'a l'âge de 28 jours les bétons traité thermiquement développent une structure très poreuse et de faible qualité a des

caractéristiques similaires à ceux pour un béton de 2 à 3 jours muri dans les conditions normales.

III.5.3 Bilan

Le béton est un matériau poreux. En d'autres termes, il comporte des pores ou vides. Ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs. La porosité d'un matériau représente le volume de tous les capillaires cumulés.

A l'issu des résultats précédentes, on peut affirmer ce qui suit :

- Le laitier des haut fourneaux améliore la porosité et l'absorption des BAP contrairement à l'addition calcaire qui nuire ces deux critère, et cela pour toutes les températures de cure.
- La porosité et l'absorption des BAP à base de la pouzzolane naturelle sont affectées négativement par l'augmentation de la température de cure.
- La cure à 40°C est la plus adéquate en termes de porosité et absorption, contrairement à la cure à 80°C qui augmente d'une façon remarquable ces paramètres.

III.5 Conclusion

Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que l'incorporation des additions minérales dans les bétons autoplaçant a un effet dissemblable sur les caractéristiques de ces bétons soit à l'état frais ou durci, et cela dépond du type d'addition et la température de cure. En effet chaque addition et chaque température de cure à des avantages et des inconvenants :

Le calcaire a amélioré d'une façon remarquable les caractéristiques à l'état frais mais sans aucune participation à la résistance et même un affaiblissement des paramètres de transfère est révélé pour les BAP à base de cette addition, et cela pour toutes les températures de cure.

Le laitier est une addition très efficace, il a donné au BAP plus de fluidité, plus de résistance et plus de durabilité et surtout pour les températures élevé.

La pouzzolane naturelle a montré ses effets bénéfiques qu'à une température de 20°C, au de-là, les BAP à base de cette adition sont les moins performants, même à l'état frais ce béton est le moins fluide.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMENDATIONS

Conclusions Générales

L'utilisation du béton autoplaçant (BAP) a eu récemment une forte progression dans de nombreux pays du monde. Bien que ces avantages soient concrets et que l'intérêt qu'il suscite chez les industriels soit grandissant, les BAP demeurent en dessous de l'utilisation qui pourrait en être faite en raison de questions sans réponses posées par de nombreux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre. Certaines des inconnues qui les concernent telle que le comportement des BAP vis-à-vis des températures élevées. Ce qui nécessite donc d'apporter des résultats des recherches qui répondent à ces questions.

L'objet de cette étude était donc, d'étudier l'effet de substitution de 15% du volume de ciment par l'un des trois additions minérales disponibles en Algérie tel que le calcaire, le laitier et la pouzzolane naturelle sur les performances d'un béton autoplaçant soumis à quatre températures de murissement humide (20, 40, 60 et 80°C) pendant sept jours, suivi par un murissement humide à 20°C jusque l'échéance des essais.

En se basant sur les résultats obtenus à travers cette étude, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Il est possible d'avoir des propriétés autoplaçantes pour tous les BAP lorsque le ciment est substitué par 15% de l'un des additions employées dans cette étude. Toute fois un gain dans les mesures de fluidité et de déformabilité a été observé par l'emploi du calcaire ou laitier, contrairement à la pouzzolane qui a développé un BAP moins ouvrable mais le plus stable vis-à-vis la résistance à la ségrégation.

- Quelque soit la température de cure, tous les BAP sont considérés comme satisfaisants pour l'application dans les éléments structuraux et cela sur la base des résultats trouvés sur les résistances mécaniques (compression et traction), la déformation élastique et les propriétés de transfert (porosité et absorption).

- La meilleure addition pour substituer le ciment à 20°C est la pouzzolane naturelle, en outre le laitier avec sa réactivité lente qui lui donne un effet d'un retardateur de prise, n'est efficace qu'à long terme. Toutefois, l'utilisation de l'addition calcaire peut être justifiée que par des considérations économiques et écologiques particulières.

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

- A des températures de cure élevées, le laitier granulé est l'addition la plus efficace, L'efficacité de cette addition est plus importante et se présente à un âge précoce plus la température est élevée, En outre cette augmentation de la température agit négativement sur l'efficacité de la réaction pouzzolanique de la pouzzolane naturelle. Toutefois le calcaire reste toujours une addition inerte sur l'hydratation du BAP.

- Au jeune âge, la résistance est augmentée considérablement avec l'augmentation de la température, l'activation d'hydratation s'arrête à 40°C pour les BAP sans additions et les BAP à base de la pouzzolane et à 60°C pour les BAPC, par contre est toujours importante pour les BAPL même à 80°C.

- La température de murissement de 40°C, est considérée comme optimale dans le cas des BAP, en effet la cure à cette température engendre une amélioration dans les propriétés mécaniques et celles du transport de tous les BAP et dans tous les âges mais au-delà de cette température, ces caractéristiques commencent à s'affaiblir à long terme.

- Les BAP subissent un murissement à des températures élevées, le laitier granulé est considéré comme l'addition la plus convenable pour être incorporée dans ces bétons. En effet des résistances de 42 et 64 MPa ont été trouvées à 3 et 90 jours respectivement pour 60°C contre 49 et 62 MPa pour 80°C.

Recommandations

Les observations et les analyses que nous avons effectuées dans le cadre de cette étude pourraient mener à des développements futurs dans le domaine du traitement thermiques des bétons à base d'additions minérales. Pour cela on recommande d'approfondir notre recherche par les points suivants :

- Etudier les effets des températures élevées sur d'autres propriétés des Bétons autoplaçants telles que les propriétés de transport (perméabilité à l'oxygène et à l'eau, migration des ions chlores, etc.) et la durabilité (carbonatation, gel dégel, lixiviation, etc.) ;

- Etude détaillée de la microstructure des différents mélanges (MEB et DRX) ;

- L'application du traitement thermique dans les premières heures d'hydratation des bétons autoplaçants ;

- Etude de l'effet de température sur des mélanges à des taux plus élevés des substituions de ciment par des additions précisément le laitier granulé ;

- Etude de l'effet de température sur des BAP à base d'un liant ternaire et quaternaire (Combinaison des additions minérales).

RÉFÉRENCESBIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] KHAYATK.H., PAVATET., ASSAD J., 2003 « Analysis of Variations in Electrical Conductivity to Assess Stability of plastic Cement-Based Materials », ACI Materials Jr.,vol. 4, N°100,pp.342-350.

[2] SEDRAN T., 1995 « Les bétons autonivelants - Synthèse bibliographique », Bulletin liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, pp. 53-60.

[3] ABIB Z., 2004 « formulations et caractérisationdes bétons autoplaçants » Mémoire de Magister, U.S.T.H.B.,Algérie.

[4] El-ARISS B., 2006 « Effect of reducing coarse aggregates on concrete strength » Construction and Building Materials J., Vol. 20, pp. 149–157.

[5] TANGTERMSIRIKUL S., BUIV. K.,1995« Blocking criteria for the aggregate phase of self-compacting high performance concrete », Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Thailand, pp.58-69.

[6] OZAWA K., TANGTERMSIRIKUL S., MAEKAWA K., 1992« Role of powder materials on the filling capacity of fresh concrete, Proceeding of the 4th CANMET/ACI Conference on fly Ash, Silica Fume and natural Pozzolans in concrete », Istambul, pp121-137.

[7] BUI V. K., 1994 « A method for the optimum proportioning of the aggregate phase of highly durable vibration-free concrete », MSc thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

[8] FEBELCEM., 2005« Les bétons autoplaçants », Fédération de l'Industrie Cimentière Belge Bruxelles.

[9] BETHMONT S., 2005 « Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) Etude expérimentale des interactions granulaires » Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

[10] DOMONEP., 2006 « self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, cement and concrete composites »,Cement and Concrete Composites J., Vol. 28, pp. 197-208.

[11] DOMONE P.L., CHAI H.W., JIN J. , 1999 « Optimum mix proportioning of self-compacting concrete »Proceeding on international conference on 'innovation in concrete structures: design and construction,University of Dundee, ed. Dhir RK and Jones MR, Thomas Telford, London, pp. 277-285.

[12] DOMONE P.L., JIN J., 1999« Properties of mortar for self-compacting concrete », Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 13-15 September, 109-120.

[13] BENSEBTIS, 2008« Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux », thèse de doctorat de l'université de MENTOURI-CONSTANTINE,Algérie.

[14] OKAMURA H., OUCHI M., 2003 « Self-compacting concrete », Journal of advanced Concrete Technology, Vol. 1, N°1, pp. 5-15.

[15] NEWMAN J., CHOO B.S, 2003 « Advanced Concrete Technology: Processes », ISBN 0 7506 5105 9, Great Britain.

[16] KHAYAT K. H., 1999 « Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidationg Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 3.

[17] BOUKENDAKDJI O., 2010« Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires », Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie.

[18] EDAMATSU Y., NISHIDA N., OUCHI M.,1999« A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse and mortar particles », Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suede, pp. 309-320.

[19] WESTERHOLM M., LAGERBLAD B., SILFWERBRAND J., FORSSBERG E.,2008 « Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars » Cement & Concrete Composites, Vol. 30, pp. 274–282.

[20] FANG W., JIANXIONG C., CHANGHUI Y., 1999« Studies on Self-Compacting High Performance Concrete with high volume mineral additives » Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete in Sweden, pp. 569-578.

[21] SPENGLER A., SCHIESSL P., 2001 « Sand-rich Self-Compacting Concrete » Proceedings of the second International Symposium on Self-Compacting Concrete, Japan, pp. 387-392.

[22] Association Française de Génie Civil, 2008 « Recommandations pour l'emploi des Bétonsautoplaçant ».

[23] BOUKHELKHALA., 2012 « Rhéologie, Caractérisation Physico-mécaniques Et Durabilité Des Bétons Autoplaçants À Base De La Poudre De Marbre », Mémoire de Magister, Université Ammar Telidji De Laghouat, Algérie.

[24] LIU M., 2009« Wilder application of additions in self-compacting concrete », thèse de doctorat, Université de London, UK.

[25] SONEBI M., BARTOS P.J.M.,1999« Hardened SCC and its bond with reinforcement », Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden,pp. 275-89.

[26] OZAWA K., MAEKAWA K.,OKAMURAH.,1992« Development of high performance concrete », Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Vol.41, N°3, pp. 381-439.

[27] FELEKOGLUB., 2008 «A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete», Construction and Building Materials J., Vol. 22, N° 4, pp. 646-54.

[28] NOUMOWE A., CARREH., DAOUD A.,TOUTANJI H., 2006 « High-strength self-compacting concrete exposed to fire test», Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.18, N°6,pp. 754-8.

[29] NEHDI M., 2000 « Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials », Cement and Concrete Research J., Vol. 30, pp. 1603-1669.

[30] KHELIFA R.,2002 «L'impact des cimenteries sur l'environnement, Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans.

[31] Rapport d'essais préliminaires, 2005«Etude de ciments aux ajouts», Entreprise Régionale des Cimenterie de l'Est ERCE, Cimenterie de Ain-Touta.

[32] ZHANG X., HAN J., 2000, « The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste », Cement and Concrete Research J., Vol.30, N°5, pp. 827-830.

[33] NEHDI M., MINDESS S., AÏTCIN P. C.,1998« Rheology of high-performance concrete: Effect of ultrafine particles », Cement and Concrete Research J., Vol.28, N°5, pp. 68-697.

[34] CYRM.,1999« Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires », thèse de doctorat en cotutelle, INSA de Toulouse et Université de Sherbrooke.

[35] CYR M., MOURET M., 2003, « Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures : Consequences on self-Compacting Concrete design », Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Allemagne, pp. 241-255.

[36] LANGE F., MÖRTE H., RUDERT V.,1997« Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties », Cement and Concrete Research J., Vol.27, N°10, pp. 1481-1488.

[37] DREUXG., FESTAJ., 1998 « Nouveau guide du béton et de ses constituants » huitième édition, Eyrolles, France.

[38] El HILALIA.,2009« étude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants : Influence des fines calcaires et des fibres végétales », thèse de doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, France.

[39] BARON J., OLLIVIER J. P., 1996« Les bétons, Bases et données pour leur formulation ». Publication ATHIL, édition Eyrolles, 552 pages.

[40] JOLICOEUR, SIMARD, 1998« chemical admixture-cement interactions : henomenology and physico-chemical concepts, Cement and Concrete Research J., Vol. 20, pp. 87-101.

[41] BJÖRNSTRÖM J., CHANDRA S.,2003 « Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements » Materials and Structures J.,Vol. 36, pp. 685-692.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[42] AGARWAL S.K., MASOOD I., MALHOTRA S.K., 2000 « Compatibility of superplasticizers with different cements » Construction and Building Materials J., Vol. 14, pp. 253-259.

[43] AÏTCIN P.C., JIANG S., KIM B.G., Nkinamubanzi P.C., PETROV N.,2001 « L'interaction ciment/superplastifiant : Cas des polysulfonates » Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées - 233, pp. 87-98.

[44] KHAYAT K., 1999, « Les Bétons Autonivelants, Les Bétons : Bases et Données pour leur Formulation, Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques », Edition Eyrolles, Paris, Troisième Tirage.

[45] MENAI K., 1995« Etude de l'Effet d'Ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants », Mémoire de Maîtrise en Sciences Appliquées. Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, CANADA.

[46] GHEZALA., 1999« Modélisation Statique du Comportement des BAP et Optimisation », Mémoire de maitrise en génie civil, Université de Sherbrooke, CANADA.

[47] BENDJILLALIK.,2011 « Comportement physico-mécanique du béton en zones arides : Apport du traitement de cure en climat réel de Laghouat »,thèse de magister, Université de Laghouat, Algérie.

[48] EFNARC, 2002 « Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete ».

[49] EFNARC, 2005« The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification,Production and Use ».

[50] De SCHUTTER G., 2005« Guidelines for testing fresh self-compacting concrete »,

[51] AFGC, 2008 « Recommandation pour l'emploi des bétonsautoplaçant ».

[52] NF EN 206-9,2010« Béton, Partie 9: Règlescomplémentaires pour le béton autoplaçant ».

[53] ASSIÉ S., 2004 « Durabilité des bétons autoplaçants» thèse de doctorat,Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions INSA-UPS Génie Civil, Toulouse, France.

[54] LARRARD F., SEDRAN T., HU C., SZITKAR J.C., JOLY M., DERKX F.,1996« Evolution of the workability of superplasticized concrete: assessment with BTRHEOM rheometer », RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Concrete, RILEM proceedings32, Glasgow, Scotland, pp. 377-388.

[55] BENKECHKACHG., 2007« Etude du comportement différé des bétons autoplaçants : Influence des paramètres de composition et de chargement », thèse de Magister de l'Université de Montouré Constantine, Algérie.

[56] EL BARRAK M., 2005« Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais » Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, France, 228 pages.

[57] SEDRAN T., 1999« Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.

[58] KLUG Y., HOLSCHEMACHER K., 2003« Comparison of the hardened properties of Self-Compacting and Normal Vibrated Concrete » 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, pp. 596-605.

[59] PINEAUDA., 2007« Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons Autoplaçants et application à l'industrie de la préfabrication ». Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise,France, page 271.

[60] TURCRY P., ROZIERE E.,LOUKILI A.,2005« Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait des bretons autoplaçants ». XXIIIème RencontresUniversitaires de Génie-Civil, Grenoble.

[61] UYSAL M.,YILMAZ K., 2011« Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete »,Cement and Concrete Composites J., Vol. 33,pp.771-6.

[62] DEHWAHH.A.F., 2012« Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume or fly ash », Construction and Building Materials J., Vol.26, pp.547–551.

[63] CHOI Y.W., KIM Y.J., SHIN H.C., MOON H.Y.,2006 « An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete » Cement and Concrete Research J., Vol. 36, pp. 1595–1602.

[64] GUNEYISI E., GESOGLU M.,2008 « A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag » Materials and Structures J., Vol. 41, pp. 479–493.

[65] NASSIF H.H., NAJM H., SUKSAWANG N., 2005 « Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC » Cement & Concrete Composites J., Vol. 27, pp. 661–670.

[66] FELEKOGLU B., TURKEL S., BARADAN B., 2007 « Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete » Building and Environment J., Vol. 42, pp. 1795–1802.

[67] European Union Growth Contract No. G6RD-CT-2001-00580, 2005« Measurement of properties of fresh self-compacting concrete » Final Report – Project coordinator: ACM Centre, University of Paisley, UK.

[68] ROZIERE E., GRANGER S., TURCRY P., LOUKILI A., 2007« Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete », Cement and Concrete Composites J., Vol. 29, pp. 626–636.

[69] KAPOOR Y., MUNN C., CHARIF K., 2003« Self-Compacting concrete – an economic approach » Proceedings of Seventh International Conference on Concrete in Hot and Aggressive Environments,Manama, Kingdom of Bahrain, pp.509–19.

[70] ROUIS F., 2007, « Formulation et Propriétés Mécaniques des Bétons Autoplaçants à Base de Laitier de Haut Fourneau », Mémoire de Magister, Université Yahia Farès de Médéa,Algérie.

[71] ZHU W., BARTOS P. J. M., 2003, « Permeation properties of self-compacting concrete », Cement and Concrete Research J., Vol. 33, pp. 921-926.

[72] BOEL V., AUDENAERT K., DE SCHUTTER G.,2002, « Pore structure of self-compacting concrete », First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pp. 837-843.

[73] HOU W.M., CHANG P. K., HWANG C.L.,2004 « A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag » Cement and Concrete Research J., Vol. 34, pp. 615–622.

[74] MORTSELL E., RODUM E.,2001« Mechanical and durability aspects of SCC for road structures », Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 459-468.

[75] ROUGEAU P., MAILLARD J.L., MARY-DIPPE C.,1999« Comparative study on properties of self-compacting concrete and high performance concrete used in precast construction », Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 251-261.

[76] SIDDIQUE R., 2011« Properties of self-compacting concrete containing class F fly as », Materials and Design J., Vol. 32,pp.1501–7.

[77] ROUGEAU P., MAILLARD J.L. and MARY-DIPPE C.,1999« Comparative study on properties of self-compacting concrete and high performance concrete used in precast construction », Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 251-261.

[78] HAMMAT S.,2012« Influence du laitier et de la pouzzolane sur retrait des mortiers autoplaçants ». Mémoire de Magister,Université Saad Dahleb de Blida, Algérie.

[79] FELEKOGLU B., 2007 « Utilization of high volumes of limestone quarry wastes in concreteindustry (self-compacting concrete case) », Resources, Conservation and Recycling, Volume 51, Issue 4, p770-791.

[80] BOSILJKOV V. B., 2003« SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler », Cement and Concrete Research J., Vol.33, p1279-1286.

[81] YE G., LIU X., De SCHUTTER G., POPPE A. M., Taerwe L., 2007 « Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes », Cement & Concrete Composites J., Vol.29, pp. 94-102.

[82] CYR M., 1999 « Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologiques des matrices cimentaires », Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, France.

[83] LAWRENCE P., 2000« l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires », Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, Toulouse III, France.

[84] LAWRENCE P., CYR M., RINGOT E.,2003 « Mineral admixtures in mortars, Effect of inert materials on short-term hydration », Cement and concrete research J., Vol. 33, pp. 1939-1947.

[85] CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E., 2006« Efficiency of mineral admixtures in mortars, Quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength », Cement and concrete research J., Vol. 36, pp. 264-277.

[86] KARA ALI R., 2002 « Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires », Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, France.

[87] BESSA-BADREDDINE A., 2004 « Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers », Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, France.

[88] BOUDCHICHA A., 2007, « Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons », Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université Mentouri Constantine, Algérie.

[89] FELEKOGLU B., TOSUN K., BARADAN B., ALTUN A., UYULGAN B.,2006 « The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars »,Cement and concrete research J., Vol. 36, pp. 1719-1726.

[90] GRZESZCZYK S., LIPOWSKI G.,1997 « Effect of content and particle size distribution of high calcium fly ash on the rheological properties of cement pastes », Cement and concrete research j., Vol. 27, pp. 907-916.

[91] JIANG S., VAN DAMME H., 1996 « Influence des fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C3S », Rapport de CRMD-ATILH, Université d'Orléans.

[92] RAMLCHAN T., THOMAS M. D. A., HOOTON R. D., 2004 « The effect of Pouzzolan and Slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature, Part II: Micro-structural and microchemical investigations », Cement and Concrete Research J., Vol. 34,pp. 1341-1356.

[93] DIEDERICH P., 2010 « Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton », Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III, France.

[94] JONES M. R., ZHENG L., NEWLANDS MD.,2003« Estimation of the filler content required to minimize voids ratio in concrete », Magazine of Concrete Research, Vol.55, N° 2, pp.193- 202.

[95] SCHMIDT M.,1992 «Cement with interground additives capabilities and environmental relief, Part 1 » Zement-Kalk-Gips, Vol. 45, N° 2, pp. 64-69.

[96] HABBOUCHE A.,2002 « Propriété mécaniques et durabilité du béton a base de sable de concassage » Mémoire de Magistère, Département de Génie Civil, Université de SAAD DAHLEB Blida, Algérie.

[97] LEGRAND C., 1971 « Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais », Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, France.

[98] MICHEL F., PIERARD J., COURARD L., POLLET V., 2007 « Influence of physic-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances », Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC, Ghent, Belgium, pp. 205-210.

[99] XIONG X., VAN BREUGEL K., 2003 « Hydration processes of cements blended with limestonepowder -Experimental study and numerical simulation » , Proceedings of the 11th ICCC , Durban.

[100] BORGHOLM H., DUNCAN H., RASMUSSEN S., 1995 « A new blended cement based on mineralised ». World Cement Research and Development, pp. 27-33.

[101] KAKALIG., 2000 « Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO3 » Cement and Concrete Research j., Vol. 30, pp. 1073-1077.

[102] NONAT A., 1994 « Interaction between chemical evolution and physical evolution, in the case of tricalcium silicate ». Materials and Structures j., pp. 187-195.

[103] TSIVILIS S., BATIS G., CHANIOTAKIS E., GRIGORIADIS G., THEODOSSIS D.,2000 « Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar », Cement and concrete research J., Vol.30, pp. 1679-1683.

[104] TSIVILIS S., TSANTILAS J., KAKALI G., CHANIOTAKIS E., SAKELLARIOU A., 2003 « The permeability of Portland limestone cement concrete », Cement and Concrete Research J., Vol.33, pp. 1465–1471.

[105] CHAIDR., JAUBERTHIEETR., BOUKHALED A.,2010 « Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons », Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, INSA - Rennes, France., pp. 91-103.

[106] ENV 197-1, 1996 «Ciments : Composition spécifications et critère de conformité-Partie I : Ciments courants » AFNOR, norme européenne.

[107] NECIRA B., GUETTALA A., CHABI S., 2007« Formulation des bétons autoplaçants: Effet des ajouts minéraux et des adjuvants » Sciences Technologies et Développement – ANDRU, N°2, pp. 66-79.

[108] BARON J., SANTEREY R., 1982 « Béton hydraulique connaissance et pratique », presse de l'école des ponts et chaussées, Ed. Eyrolles, France.

[109] BROOKS J.J., JOHARI M.A.M., MAZLOOM M., 2000 « Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete » Cement & Concrete Composites J., Vol. 22, pp. 293-301.

[110] PAINE K.A., DHIR OBE R.K., ZHENG L., 2006 « Predicting early-age temperatures of blended-cement concrete » Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Construction Materials 159 Issue CM4, pp. 163–170.

[111] AMRANE A., KENAI S.,1994 « Propriétés mécaniques et durabilité du béton au laitier en climat chaud » Proceedings du séminaire international sur la qualité du béton en climat chaud, Ghardaia, pp. 106-122.

[112] BEHIM M., CLASTRES P., HABITA M. F., CARLES-GIBERGUES A.,2004 "Etude d'un nouveau ciment à base de Laitier granulé d'El-Hadjar (Algérie)" Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, pp. 21-29.

[113] VENUAT M., 1976 « La pratique des ciments et des bétons », Edition du Moniteur, Paris, p. 75-224.

[114] BOUGARA A., LYNSDALE C., Ezziane K., 2007« Activation of Algerian slag in mortars » Construction and Building Materials J., Vol. 23, pp. 542–547.

[115] GANE R.R., 2002 « Cours de durabilité et réparation du béton (GCI-714) », chapitre 2 : la durabilité du béton. Université de Sherbrooke, Canada, pp.32.

[116] NEHDI M., PARDHAN M., KOSHOWSKI S., 2004« Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements » Cement and Concrete Research J., Vol. 34, pp. 2103–2112.

[117] Al-OTAIBI S.,2008 « Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass » Construction and Building Materials J., Vol. 22, pp. 2059–2067.

[118] AICHOUBE A., GHRICI M., BENAISSA A., 2005« Effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire », Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, Oran, Algérie, pp. 6-7.

[119] EZZIANE K., KADRI E.H., HALLALA., DUVAL R.,2010 « Effect of mineral additives on the setting of blended cement by the maturity method », Materials and Structures J., Vol. 43, pp. 394 - 401.

[120] COLAK A.,2003 « Characteristics of pastes from from a Portland cement containing different amounts of natural pouzzolana », Cement and Concrete Research J., Vol. 33, pp. 585-593.

[121] ALLALI M., 2012« Formulation et propriétés rhéologiques des bétons autoplaçants à base d'un ciment à la pouzzolane naturelle », Mémoire de Magister de l'Université Saad Dahleb de Blida, Algérie.

[122] DIAMANTONIS N., MARINOS I., KATSIOTIS M.S., SAKELLARIOU A., PAPATHANASIOU A., KALOIDAS V., KATSIOTI M., 2010, « Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete », Construction and Building Materials J., Vol. 24, N° 8, pp. 1518-1522.

[123] TURANLI L., UZAL B., BEKTAS F.,2005« Effect of large amounts of natural pozzolana addition on properties of blended cements »,Cement and Concrete Research J., Vol. 35, N°6, pp. 1106-1111.

[124] BENKADDOUR M., KAZI AOUAL F., SEMCHA A.,2009« Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle », Revue Nature et Technologie, pp. 63-73.

[125] MANSOUR S., 2003« Etude des propriétés des mortiers et bétons à base de ciments ternaires »,Mémoire de Magister de l'Université de Blida,Algérie.

[126] BOUGLADA M. S.,2008« Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier », Mémoire de Magister de l'université de Msila, Algérie, 148 pages.

[127] BOUALLA N., KERROUZI I., SOUFARI A., 2012 « Influence de l'ajout pouzzolanique sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments au jeune âge », Science Lib Editions Mersenne, Vol 4, N ° 121003ISSN, pp. 2111-4706.

[128] HADJ SADOK A., KENAI S., MENADI B., 2008 "Résistances aux sulfates des mortiers à base de ciment au laitier", Colloque International - Caractérisation et Modélisation des Matériaux etStructures, Université M. Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.

[129] BINGOL A. F., TOHUMCUI.,2013« Effects of different curing regimes on the compressive strengthproperties of self-compacting concrete incorporating fly ashand silica fume », Materials and Design J., Vol. 5, pp.12–18.

[130] KELLOUCHEY., BOUGARA A., 2014« Effet de la température de cure sur la réactivité d'unciment au laitier », 1st International Conference on Pouzzolanic Construction Materials, ICPCM, Oran, Algérie.

[131] LI B., ZHOU M., FANG Y., SONG P., KE G.,2011 « Self-compacting Concrete-filled Steel Tubes Prepared from Manufactured Sand with a High Content of Limestone Fines», Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci.

[132] ESCALANTE J.S., GOMEZ L.Y., JOHAL K.K., MENDOZA G., MANCHA H., MENDEZ J., 2001, « Reactivity of blast furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions », Cement and Concrete Research j., Vol. 31, pp.1403-1409.

[133] ESCALANTE J. I., 2003« Nonevaporable water from neat OPC and replacement materials in composite cements hydrated at different temperatures », Cement and Concrete Research j.., Vol.33, pp.1883-1888.

[134] ANTOINE Ch., 2008 « effet couple de la formulation et du murissement sur les caractéristiques du béton autoplaçant à haute performance dans les conditions estivales », Mémoire de maitrise, Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.

[135] ÇAKIR Ö., AKÖZ F., 2008 « Effect of curing conditions on the mortars with and without GGBFS, Construction and Building Materials J.Vol.22, pp. 308–314.

[136] ZHAO H., SUN W., WUB X., GAO B., 2012, « Effect of initial water-curing period and curing condition on the propertiesof self-compacting concrete », Materials and Design J., Vol. 35, pp.194–200.

[137] RAMEZANIANPOUR A. M., ESMAEILIKh., GHAHARI S. A., RAMEZANIANPOUR A. A., 2014 « Influence of initial steam curing and different types of mineral additiveson mechanical and durability properties of self-compacting concrete », Construction and Building Materials J., Vol.73, pp.187–194.

[138] RAMEZANIANPOUR A. A., KHAZALI M. H., VOSOUGHI P.,2013 « Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A casestudy in precast concrete », Construction and Building Materials J., Vol. 49,pp. 807–813.

[139] ALI HUSSEIN Z. M., 2011 « The Effect of Accelerated Curing on CompressiveStrength of Self – compacting Concrete », Journal of Engineering and Development, Vol. 15, N°.4, pp. 1813- 7822.

[140] VINH-AN Le, 2014, « Comportement des bétons autoplaçant par temps chaud », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France.

[141] FERHAT BINGOL A., TOHUMCU I., 2013 « Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self-compacting concrete incorporating fly ash and silica fume », Material and Design J., Vol. 51, pp.12–8.

[142] MANNAN M. A., BASRI H. B., ZAIN M. F. M., ISLAM M. N., 2002« Effect of curing conditions on the properties of OPS-concrete ». Build Environ j., Vol.37, pp1167–71.

[143] HANSEN W.C.,« Studies relating to the mechanism by which alkali- aggregate reaction produces expansion in concrete », Proc. Amer. Concr. Inst. Vol.40, 1944, pp. 213-227.

[144] PROC, Seventh international congress on the chemistry of cement, Paris, 1980.

[145] Specification for Portland blast furnace cement, British Standards Institution, London, Part 2, 1973, pp. 7.

[146] MIRZA WH, NOURY SI, BEDAWI WH., 1991 « Temperature on strength of mortars and concrete containing blended cements ». Cement and Concrete Comp J., Vol. 13, pp.197–202.

[147] DENT GLASSER I.S., KATAOKA, 1981 « The Chemistry of Alkali- Aggregate Reaction », Cement and concrete Research J., Vol.11, pp. 1-9.

[148] ESCALANTE-GARCIA J. I., SHARP J. H., 2001 « The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures ». Cement and ConcreteResearch J.,Vol. 31, pp.695–702.

[149] BROOKS J. J., KAISI A. F., 1990 « Early strength development of Portland and slag cement concretes cured at elevated temperature ». ACI Mater J., Vol.87, N°5, pp.503–7.

[150] MA W., SAMPLE D., MARTIN R., BROWN PW., 1994 « Calorimetric study of cement blends containing fly ash, silica fume and slag at elevatedtemperatures , cement and concrete and aggregates ». CCAGPD, Vol. 16, N°2, pp.93–9.

[151] PRATAS J.D., 1978 « Early age strength development of slag cement concretes », Msc. Dissertation, university of Leeds, England.

[152] NEVILLE D.M. «Properties of concrete», 3rd Edt. Pitman, London, 1981.

[153] VIDELA C. C., COVARRUNBIAS J. P. T., PASCAL J. M. D., 1996 « Behavior in extreme climates of concrete made with different types of cement » In: DhiRK, McCarty MJ, editors. Appropriate concrete technology, pp. 213–241.

[154] WAINWRIGHT P.J., TOLLOCZKO J.J.A., 1986 « The early and later age properties of temperature cycled OPC concrete », 2nd Int. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Ottawa, Vol.2, pp. 1293-1321.

[155] KANSTAD T., HAMMER T.A., BJONTEGAARD O., SELLEVOLD E.J., 2013 « Mechanical properties of young concrete: Part I: Experimental results related to test methods and temperature effects », Materials and Structures J., Vol. 36, N°4, pp. 218-225.

[156] KIM K. J., SANG H. H., YOUNG C. S.,2002« Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete. Part I. Experimental results », Cement and Concrete Research J., Vol.32, pp.1087-1094.

[157] PARRA C., VALCUENDE M., GOMEZ F., 2011«Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete», Construction and Building Materials J., Vol.25, pp. 201–207.

[158] TAN O.E., GJORV, 1996 « Performance of concrete under different curing conditions », Cement and Concrete Research J.,Vol.26, N°3,pp.355-361.

[159] MONZO J., BORRACHERO M.V., 1995 « Mechanical treatment of fly ashes:strength development and workability of mortars containing ground fly ashes, fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete » In: Proceeding fifth international conference, Milwaukee, Wisconsin,USA,pp. 339–531.

[160] GALLUCCI E., ZHANG X., SCRIVENER K., 2006 « Influence de la température sur le développement microstructural des bétons », Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, Toulouse, France.

[161] ZEVCOVIC S. D., 1989 "The effect of increased temperature on fresh and hardened concrete",Concreting in hot climates, Edited by Walker M. J, E & FNB, London, pp.3-12.

[162] BOUKNI B., BENSEBTI S., CHABANE A., HOUARI H., 2007« Comportement des bétons autoplaçants à haute température» Journée d'études sur les bétons hydrauliques et hydrocarbonés » université du 20Août 1955, Skikda, Algérie.

[163] AGGOUN A., YURTDAS I., BERTHET J. F., LI A., 2008 «Influence de la températuresur le comportement mécanique des bétons autoplaçants ».

[164] ABBASI A. F., 1990 « Effect of hot weather on pulse velocity and modulus of elasticityof concrete », Materials and StructuresJ., Vol. 23, pp.334-340.

[165] GESOĞLU M., 2010 « Influence of steam curing on the properties of concretesincorporating metakaolin and silica fume », Materials and Structures J., Vol.43, pp.1123–1134.

[166] Al-AMOUDI M., MASLEHUDDIN, SAADI, 1995« Effect of Sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements », ACI Materials journal, Vol. 92, N°1, pp. 15-24.

[167] NGUYEN.T, 2006 « Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires », Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, France.

[168] BELAROUCI A.,2011, « Influence de la température sur le transfert des ions chlores dans les bétons », Thèse de Magister, UniversitéAboubekr Belkaid – Tlemcen, Algérie.

[169] CABRERA J. G., NWAUBANI S. O., 1993 « Temperature effect on strength and pore structure of concrete made with a natural pozzolana » Proceedings of Concrete in Hot Climates, pp.101-113.

[170] HAQUE M.N., KAYALI D.A., 1989 « Strength and porosity of hardened cement fly Ash pastes in Hot environment »ACI Materials Journal, Vol. 86, N°4, pp.485-490.

[171] AUSTINS. A., ROBINS P.J., 1993« Performance of slag concrete in hot climates » Proceedings of Concrete in Hot Climates, pp.129- 139.

[172] SMITH B.G., 2001« durability of silica fume concrete exposed to chloride in hot climates » Journal of Materials in Civil Engineering, pp.41-48.

[173] DERABLA R., LARBI B. M., 2014« Characterization of heat-treated self-compacting concrete containingmineral admixtures at early age and in the long term », Construction and Building Materials J., Vol. 66, pp. 787–794.

[174] DROUETE., 2010 « Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires prise en compte des transferts hydrique », Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieur de Cachan, France.

[175] BRUEF., 2009 « Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hygro-mécanique des bétons », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, France.

[176] POYETS., 2009 « Experimental investigation of effect of temperature on the first desorption isotherm of concrete », Cement and concrete research J., Vol.39, pp. 1052-1059.

[177] SAADIS., 2007 « Effet de l'Environnement de Cure sur les Propriétés des Ciments Ternaires (CPA-PN-FC) », Thèse de Magister, Université de Blida, Algérie.

[178] CARÉS.,2008 « Effect of temperature on porosity and chloride diffusion in cement pastes »Construction and Building Materials J., Vol.22, pp. 1560-1573.

[179] STITIS., 1999 « Le pari des ciments Algérien » Habitat et construction, Alger, N°05, pp.32-39.

[180] NF EN 196-6, 1990, « Méthodes d'essais des ciments. Partie 6: Détermination de la finesse », AFNOR.

[181] NF EN 196-3, 1995, « Méthodes d'essais des ciments. Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité », AFNOR.

[182] NF EN 196-1, 1995, « Méthodes d'essais des ciments. Partie 1: Détermination des résistances mécaniques », AFNOR.

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

[184] 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.

[185] 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.

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

[187] NF EN 1097-2, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques etphysiques des granulats. Partie 2: Méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation », AFNOR.

[188] NF EN 1008, 2003, « Eau de gâchage pour bétons: spécification d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton », AFNOR.

[189] DOMONE P.L.J., JIN J., 1999 « Properties of mortar for Self-Compacting Concrete »Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete,Stockholm, RILEM Proceedings PRO 7, Paris, pp. 109–120.

[190] GIRISH S., RANGANATH R.V., VENGALA J., 2010 « Influence of powder and paste on flow properties of SCC », Construction and Building Materials J., Vol. 24, pp. 2481–8.

[191] EDAMATSU Y., NISHIDA N.,OUCHI M., 1999« A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles », Proceedings of the FirstInternational RILEM Symposium on Self-compacting Concrete, Stockholm, Sweden, pp. 309-20.

[192] PEDERSEN B., SMEPLASS S., 2003« The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase », Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Island, pp106-16.

[193] KIM J.K., HAN S.H., PARK S.K., 2002« Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete, Part I: Experimental results », Cement and Concrete Research J., Vol. 32, N°7, pp.1087-1094.

[194] YAZICI H., YARDIMCI M. Y., AYDIN S., KARABULUT A. S., 2009 «Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes», Construction and Building Materials J., Vol.23 2009, pp. 1223–1231.

[195] EZZIANE K., BOUGARA A., KADRI A., KHELAFI H., KADRI E. H., 2007 « Compressive strength of mortar containing natural pozzolana under various curing temperature », Cement & Concrete Composites J., Vol.29, pp.587–593.

[196] NAWA T., IZUMI T., EDAMATSU Y., 1998 «State- of- the-art- report on materials and design of self-compacting concrete» Proc. of Int. Workshop on Self-compacting Concrete, Kochi University of Technology, Japan, pp. 166-190.

[197] CHAI H., 1998 « Design and testing of SCC» Ph.D Thesis, University College of London (UCL), 259 pages.

[198] SONEBI M., BARTOS P.J.M., 2002 « Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete » Materials and Structures J., Vol. 35, pp. 462-469.

[199] MATABEE K., YAMADA K., UCHIDA A., 1999 « Evaluation on the practicability of SCC » Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Sweden, pp. 617-628.

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

[201] NF EN 12390-5, 2001, « Essai pour béton durci. Partie 5 : Résistance à la flexion des éprouvettes », AFNOR.

[202] NF EN 12504-4, 2005, « Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son », AFNOR.

[203] NF EN 1352, 1997, « Détermination du module d'élasticité statique en compression du béton cellulaire autoclavé et du béton de granulats légers à structure ouverte », AFNOR.

[204] GINETTE A., HUGUES H., 2007, « GranDuBé : Grandeurs associées à la durabilité des bétons », Association française de génie civil, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

[205] Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », Toulouse, France.

[206] EZZIANE K., 2007, « Etude des Modifications Physico-Mécaniques apportées par les Ajouts Minéraux aux Bétons ». Thèse de Doctorat, Université Hassiba Ben-Bouali Chlef, Algérie.

[207] HADJ SADOK.A., 2012, « Caractéristique mécanique et durabilité des mortiers à base de ciment au calcaire », Thèse de Doctorat, Université Hassiba Ben Bouali.,Algérie.

[208] TURKEL S., ALABS V.,2005«The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete», Cement and CconcreteRresearch J., Vol.35, N°2, pp.405-411.

[209] MA W., SAMPLE D., MARTIN R., BROWN P., 1994 « Calorimetric study of cement blends containing flyash, silica fume and slag at elevated temperatures, Cement Concrete and Aggregates », 16(2), 993-991.

[210] ROMPAY G.V., 2007 « Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré », Thèse de Doctorat,

[211] BATTAGIN A.F.,1992, in 9th International Congress on the Chemistrv of Cement, New Delhi,Indi, Vol. 3.4 p. 166-172.

[212] ROSE J.H. «The influence of curing temperature on the strength of concrete containing granulated blast furnace slag», Ref 4, pp. 445-466.

[213] LUKE K., GLASSER F. P., 1987 « Selective dissolution of hydrated blast furnace slag cements » Cem. Concr. Res J., Vol. 17(2), pp. 273–82.3.

[214] SHOUKRYS. N., GERGIS W. W., DOWNIE B., RIAD M. Y., 2011, « Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete », Construction and Building Materials J., Vol. 25, pp. 688–696.

[215] KEJIN W., ZHI G., 2013, «Evaluating properties of blended cements for concrete pavements. Final report», Center for Portland Cement Concrete Pavement Technology: Iowa State University, 2003.

[216] Dhir R. K., Munday J. G. L., Ho N. Y., 1988, PFA in structural precast concrete: engineering properties, Cement and Concrete Research. Vol. 18, pp. 852-962,

[217] BOUIKNI A., 2010, Comportement du béton a base du laitier d'El-Hadjar sous différentes cures, Thèse de Doctorat d'état en Génie Civil, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie.

[218] SWAMY R.N., MAHMUD H.B., 1998« Mix proportions and strength characteristics of concrete containing 50 per cent low-calcium fly ash », ACI publ SP -91, Vol. 1, pp. 413-432.

[219] STUTTERHEIM N., 1960 « Properties and uses of high-magnesia Portland slag cement » concrete, A.C.I Journal, Vol.56,pp. 1025-1045.

[220] BANForth P.B., 1980« In situ measurement of the effect of partial Portland cement replacement using either fly ash or ground granulated blast furnace slag on the performance of mass concrete, Proc. Instn. Civil Engrs. Part 2, Vol. 69 Sept., pp. 777-800.

[221] REINHARDT H. W., STEGMAIER M., 2006 « Influence of heat curing on the pore structure and compressivestrength of self-compacting concrete (SCC) », Cement and Concrete Research J., Vol. 36, pp. 879–885.

[222] Whitehurst, E.A, 1951 « Soniscope tests concrete structures », Journal of the ACI; 47: 443‑4.

[223] IBRAHIM TÜRKMEN, ALIÖZ, ABDULKADIR CÜNEYT A., 2010 « Characteristics of workability, strength, and ultrasonic pulse velocity of SCC containing zeolite and slag », Scientific Research and Essays J., Vol. 5(15), pp. 2055-2064.

[224] MUCTEBA U., MANSUR S., 2011 « Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures », Construction and Building Materials J., Vol.25, pp. 4112–4120.

[225] THARMARATRAM K.,TAN B.S.,1990 « Attenuation of Ultrasonic Pulse in Cement Mortar », Cement and Concrete Research J., Vol.20, pp. 335–40.

[226] ULUCAN Z. C., TURK K., KARATAS M., 2008 « Effect of mineral admixtures on the correlation between ultrasonic velocity and compressive strength for self-compacting concrete », Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 44, N°5, pp. 367–74.

[227] HO DWS, CAO T., 1994 « Water sorptivity of steam cured concrete. CIA (NSW) seminar on the structural use of precast concrete » Concrete Institute of Australia, pp10.

[228] HO DWS, CHIRGWIN G. J., MAK S. L., 1997 « Water sorptivity of heat-cured concrete for bridge structures ». In: Proceedings of third CANMET/ACI international conference on advances in concrete technology, Auckland, pp. 97–108.

[229] MOURET M., BASCOUL A., ESCADEILLAS G.,2005 « Strength impairment of concrete mixed in hot weather: analysis in relation to physical and chemical properties of hardened concrete », Magazine of Concrete Research J., Vol. 57, 5, pp. 301-308.

[230] BOUCETTA T. A., 2014,« Contribution du laitier granulé et de la poudre deverre sur les propriétés d'écoulement et dedurabilité des bétons autoplaçants et de hautesperformances », Thèse de Doctorat, Université d'Annaba, Algérie.

ANNEXE A

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER AUTOPLAÇANT

ANNEXE A : METHODE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER

A.1. LES DONNEES :

. Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment : ρ_C=3150 kg/m^3
- Sable : ρ_S =2660kg/m^3
- Superplastifiant : ρ_{Sp}=1065kg/m^3
- Eau : ρ_E=1000kg/m^3

Coefficient d'absorption du sable A_b= 1,2%.

Humidité du sable : 0%.

Le rapport Sable/Mortier est fixé à 0,5.

Le rapport ***E/L*** est fixé à0,42.

Le superplastifiant est un haut réducteur d'eau de la troisième génération commercialisé sous le nom « MEDAFLOW 145 », de type polycarboxylate est formulé à base de polymère de synthèse combinée. Il est de 40% extrait, le dosage en superplastifiant est fixé à 1,6% du poids du liant.

A.2 Calcul de l'humidité du sable :

L'échantillon de sable est pesé à l'état naturel (M_1), il est mis dans l'étuve à 105°C pendant 8 minutes puis pesé une deuxième fois (M_2). L'humidité du sable μ_S est calculée par :

$$\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_2} X100$$

A.3 Calcul des quantités de chaque constituant :

A.3.1 Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment %***C***:

$$\%C_{vol} = \frac{(1 - S/M)}{(1 + E/C_{parvolume})} * 100$$

La quantité de ciment ***C*** en **kg**:

$$C(kg) = \frac{V \times E/C_{parvolume}}{100} \times \rho_C$$

A.3.2 Le Sable

La quantité du sable en kg est S

$$S(kg)=(1+\frac{Correction}{100})\times(\frac{V\times S/M\times\rho_S}{100})$$

A.3.3 Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est ***Sp*** :

$$Sp(kg)=\frac{\%Sp\times C}{100}$$

A.3.4 L'eau

L'eau ajoutée au mortier (***E***) est divisée en deux parties. 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 et ajoutée au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.
Le pourcentage d'eau en volume : $\%E_{vol}$

$$\%E_{vol}=\frac{(1-S/M)\times 100\times E/C_{parvolume}}{(1+E/C_{parvolume})}$$

La quantité d'eau globale ***E*** en litre :

$$E=(\frac{V\times\%E_{vol}}{100}\times\frac{\rho_E}{1000})-(\frac{Sp\times 70}{100})-(\frac{V\times S/M\times\rho_S}{1000}\times\frac{correction}{100})$$

Eau1 $E_1 = E\times 0.60$

Eau2 $E_2 = E\times 0.40$

ANNEXE B

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON AUTOPLAÇANT

ANNEXE B

ANNEXE B : EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

Les mêmes démarches de la composition du mortier (Annexe A) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant.

B.1. Les Données

Pour un volume de béton de V=20 litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
  - Masse volumique apparente du gravier : ρ_G =1335 kg/m^3
  - Masse volumique absolue du gravier : ρ_{AG} = 2660 kg/m^3
  - Masse volumique absolue du sable : ρ_S = 2620 kg/m^3
  - Masse volumique absolue du ciment : ρ_C =3150 kg/m^3
- Les coefficients d'absorption :
  - Coefficient d'absorption du sable : Ab_S = 1.2%
  - Coefficient d'absorption du gravier : Ab_G = 1%
- Le rapport Sable/Mortier : *S/M* = 0.50
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : *A*=1% du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de E/C_{volume}=1.288 par unité de volume de ciment et $E/C_{poids} = E/C_{volume} / \rho_A = 0.42$ par unité de poids de ciment.
- Le pourcentage de superplastifiant (MEDAFLOW 145) : *%Sp*= 1,6% du poids de ciment, il est de 40% d'extrait (donc il contient 60% d'eau).

ANNEXE B

B.2. Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse M_1 et un échantillon de gravier de masse M'_1 et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6 minutes pour le gravier et une durée de 8 minutes pour le sable, puis on pèse M_2 et M'_2 les masses respectives du gravier et du sable.

L'humidité du sable : $$\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

L'humidité du gravier : $$\mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$$

B.3. Calcul des différents composants

B.3.1. Gravier

La quantité G en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(kg) = \frac{G(kg/m^3) \times V}{1000}\left(1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100}\right)$$

B.3.2. Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (S) :

Le pourcentage du gravier G dans le béton :

$$\%G = \frac{G(kg/m^3)}{\rho_{AG} \times 10}$$

Le pourcentage du volume de mortier M par rapport au volume de béton :

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable *S* dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S/M}{100}$$

Quantité du sable *S* en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000}\left(1 + \frac{\mu_S - A_{bS}}{100}\right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition.

B.3.3. Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$\%P = \%M - \%S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$\%C = \frac{1}{1 + E/C_{volume}} \times \%P$$

La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(kg) = \%C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

B.3.4. Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton *Sp* (kg/m^3)

$$Sp(kg/m^3) = \frac{\%Sp}{100} \times \%C \times \rho_C \times 10$$

La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg/m^3) \times V$$

ANNEXE B

B.3.5. Eau

L'eau ajoutée au béton (*E*) est divisée en deux partie : la première partie (E_1) est de 70% de (*E*) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E_2), elle de 30% de (*E*) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$\%E = \frac{E / C_{volume}}{1 + E / C_{volume}} \times \%P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

L'eau contenue dans le sable : e_1

$$e_1(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000}\left(\frac{\mu_S - A_{bS}}{100}\right)$$

L'eau contenue dans le gravier : e_2

$$e_2(kg) = \frac{G(kg/m^3) \times V}{1000}\left(\frac{\mu_G - A_{bG}}{100}\right)$$

L'eau contenue dans le superplastifiant : e_3

$$e_3 = \frac{Sp(kg) \times 80}{100}$$

L'eau à extraire e : $e = e_1 + e_2 + e_3$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume Vde béton :

$$E(kg) = \frac{\%E \times 10 \times V}{1000} - e$$

Avec :

Eau1 $E_1(kg) = 0.60 \times E$

Eau2 $E_2(kg) = 0.40 \times E$