

**UNIVERSITE DE BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

Département de Génie Civil

**THESE DE DOCTORAT**

Spécialité : Génie Civil

**EFFET DU CLIMAT SUR LES CARACTÉRISTIQUES  
RHÉOLOGIQUES ET MÉCANIQUES D'UN BÉTON FLUIDE**

Par

**Djamila BOUKHELKHAL**

Devant le jury composé de :

M. ABED	Professeur, Université de Blida 1	Président
B. MENADI	Professeur, Université de Blida 1	Examineur
F. DEBIEB	Professeur, Université de Médéa	Examineur
M. BENTCHIKOU	Maître de Conférences A, Université de Médéa	Examineur
O. BOUKENDAKDJI	Professeur, Université de Médéa	Rapporteur
S. KENAI	Professeur, Université de Blida 1	Co-rapporteur

Blida, 2018

## ملخص

أظهرت الخرسانة المرسوسة ذاتيا تزايدا كبيرا في استعمالها خلال السنوات الأخيرة. كما أنه غالبا ما تدخل في تركيبة هذا النوع من الخرسانة بعض الإضافات المعدنية و ذلك للحد من المخاطر الاقتصادية و التقنية المرتبطة بالنسبة العالية لكمية الاسمنت الموجودة في هذه الخرسانة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تتعرض الخرسانة لارتفاع في درجات الحرارة الخارجية سواء في ظروف الطقس القاسية أو كعلاج حراري في مصانع انتاج الخرسانة الجاهزة. إن معرفة تأثيرات درجة الحرارة المرتفعة على الخواص الميكانيكية وديمومة الخرسانة المرسوسة ذاتيا أمرا ضروريا لتعزيز أو الحد من استخدامه ، وكذلك من أجل الاختيار الأمثل لنوع الإضافة المعدنية الملائمة في هذه الظروف.

يهدف هذا العمل الى استبدال 15% من حجم الاسمنت بأحد الإضافات 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 الإضافات 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 الإضافة المعدنية الأكثر ملاءمة لتشكيل خرسانة مرسوسة ذاتيا في حالة خضوع هذه الأخيرة للمعالجة تحت درجة حرارة عالية.

**الكلمات المفاتيح :** الخرسانة المرسوسة ذاتيا، الإضافات المعدنية، المعالجة حراريا، الخصائص الميكانيكية، الديمومة.

## RÉSUMÉ

L'utilisation des Bétons autoplaçants (BAP) s'est considérablement développée au cours des dernières années. La confection de ces bétons nécessite un grand volume de pâte permettant ainsi d'atteindre la fluidité qui fait la spécificité de cette nouvelle génération de bétons. Cependant et en raison des enjeux économiques et de performance liés à la teneur élevée en liant dans ces bétons, l'utilisation des additions minérales en remplacement au ciment est une pratique courante depuis de nombreuses années.

En outre, les bétons peuvent être exposés à des températures élevées soit dans les conditions climatiques extrêmes, dans le cas du béton de masse ou comme un procédé de cure dans la préfabrication. Les spécificités de formulation de ces bétons liées à leurs exigences de mise en œuvre pourraient modifier leur comportement mécanique à l'état durci. 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 ces conditions.

L'objectif de ce travail est 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 murissement engendre une amélioration dans les performances des BAP à jeune âge sans nuire fortement ses propriétés à long terme. Toutefois la température de murissement 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 un murissement à des températures élevées.

Mots clefs : BAP, Addition minérale, Température de cure, Résistances mécaniques, Durabilité.

## **ABSTRACT**

The use of self-compacting concrete (SCC) has grown considerably in recent years. Making these concretes requires a large volume of paste thus achieving the fluidity that is the specificity of this new concrete. However, and because of the economic and performance issues related to the high binder content in these concretes, the use of mineral additions in replacement of cement has been a common practice for many years.

In addition, concrete can be exposed to high temperatures either in extreme weather conditions, in mass concrete or under heat treatment in precast concrete. The specificities of formulation of these concretes related to their implementation requirements could modify their mechanical behavior in the hardened state. Knowledge of the effects of high temperature on the mechanical characteristics and durability of self-compacting concretes is necessary to enhance or limit its use, as well as the choice of the appropriate addition in these conditions.

The objective of this work is to study the effect of substitution of 15% of cement, by different mineral additions available in abundance in Algeria, such as slag, pozzolana and limestone fillers on mechanical properties and durability of self-compacting concrete cured under temperatures range 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 state by using these mineral additions. Increasing the curing temperature causes an improvement in performance at an early age of SCC without penalizing its long-term properties. However the temperature of 40° C is considered the optimal curing temperature to make economical and high performance self-compacting concrete. On the other hand, granulated slag is the most suitable mineral addition for SCC under elevated curing temperature.

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



## 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 Dieu le miséricordieux qui m'a donné de la chance du courage et de la volonté avec lesquels cette thèse a été achevée.*

*J'ai l'honneur d'être dirigé et encadré par mes Professeurs Monsieur BOUKENDAKDJI Otmane, Professeur à l'Université de Médéa et Monsieur KENAI Said, Professeur à l'Université de Blida, Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse d'avoir accepté d'encadrer mon travail de recherches et de m'avoir confié ce sujet de recherche intéressant. Et qui malgré leurs nombreuses responsabilités, n'ont pas hésité à consacrer de leur temps pour me faire bénéficier de leurs orientations, leurs conseils aux moments importants, et enfin à corriger minutieusement cette thèse.*

*J'exprime ma plus sincère gratitude aux membres de jury Pr ABED de l'Université de Blida, Pr MENADI de l'Université de Blida, Pr DEBIEB de l'Université de Médéa et Dr BENTCHIKOU de l'Université de Médéa, pour avoir accepté d'examiner ce travail et l'honneur qu'ils m'ont accordé en acceptant de juger ce travail de thèse,*

*En grande partie, ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de Génie Civil de l'Université de Médéa, avec l'assistance et la participation dans la réalisation des essais de Madame BACHENE Sarah, je ne saurai les remercier pour tout son aide et soutien.*

*Ce travail n'aurait pu se finaliser sans la contribution du Professeur El-Hadj KADRI, de l'Université Cergy-Pontoise (France). Mes chaleureux remerciements vont vers cette personne, pour sa gentillesse, ses conseils, ses orientations pris pour mener à bien ce travail. Je ne saurai oublier son aide efficace lors de la réalisation de la partie expérimentale, je le remercie vivement pour m'avoir accueilli à son laboratoire où j'ai pu réaliser quelques expériences d'ouvrabilité et de mesures de la chaleur d'hydratation sur mortiers.*

*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.*

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

*BOUKHELKHAL Djamilia*

# TABLE DES MATIERES

Remerciements

ملخص

Résumé

Abstract

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles et abréviations

Introduction Générale

1

## *Chapitre 1 : Revue Bibliographique*

**PAGE**

1.1. Etat de connaissances des bétons autoplaçants (BAP) .....	6
1.1.1. Définition .....	6
1.1.2. Propriétés clés des BAP .....	7
1.1.2.1. Capacité au remplissage (déformabilité) .....	7
1.1.2.2. Résistance à la ségrégation (stabilité) .....	7
1.1.2.3. Capacité au passage .....	8
1.1.3. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP .....	10
1.1.4. Spécificités de composition des BAP .....	12
1.1.4.1. Un grand volume de pâte .....	12
1.1.4.2. Une quantité de fines importante .....	13
1.1.4.3. L'emploi de superplastifiants .....	13
1.1.4.4. L'utilisation d'un agent de viscosité .....	14
1.1.4.5. Un faible volume de gravillon .....	15
1.1.5. Propriétés physico-mécaniques et durabilité des BAP .....	15
1.1.5.1. Résistance à la compression .....	16
1.1.5.2. Résistance à la traction .....	16
1.1.5.3. Module d'élasticité .....	17
1.1.5.4. Vitesse de propagation des ondes ultrasonores .....	18
1.1.5.5. Retrait .....	18
1.1.5.6. Durabilité et propriétés de transport .....	19

1.2. Effet des additions minérales sur les propriétés des BAP .....	25
1.2.1. Introduction .....	25
1.2.1.1. Avantages économiques et environnementaux .....	25
1.2.1.2. Avantages techniques .....	26
1.2.2. Mode d'action des additions minérales .....	26
1.2.2.1. Effet granulaire .....	28
1.2.2.2. Effet physico-chimique et microstructural .....	28
1.2.2.3. Effet chimique .....	30
1.2.3. Effet des additions minérales sur les caractéristiques des BAP .....	31
1.2.4. Fillers calcaire .....	31
1.2.4.1. Effet de fillers calcaire sur le comportement des BAP à l'état frais .	32
1.2.4.2. Effet de fillers calcaire sur les propriétés mécaniques des BAP à l'état durci .....	34
1.2.4.3. Effet de fillers calcaire sur la durabilité des BAP .....	37
1.2.5. Laitier granulé de haut fourneau .....	40
1.2.5.1. Effet du laitier sur le comportement des BAP à l'état frais .....	40
1.2.5.2. Effet du laitier sur les propriétés mécaniques des BAP à l'état durci	42
1.2.5.3. Effet du laitier sur la durabilité des BAP .....	44
1.2.6. Pouzzolane naturelle .....	46
1.2.6.1. Effet de la pouzzolane naturelle sur le comportement des BAP à l'état frais .....	47
1.2.6.2. Effet de la pouzzolane naturelle sur les propriétés mécaniques des BAP à l'état durci .....	48
1.2.6.3. Effet de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des BAP .....	51
1.3. Effet de la température de murissement sur les propriétés des BAP .....	52
1.3.1. Généralités .....	52
1.3.2. Propriétés mécaniques instantanées .....	52
1.3.2.1. Résistance à la compression .....	52
1.3.2.2. Vitesse ultrasonique .....	54
1.3.2.3. Module d'élasticité (en compression) .....	54
1.3.2.3. Retrait .....	55
1.3.3. Propriétés de transport et durabilité .....	56
1.3.3.1. Porosité .....	56

1.3.3.2. Absorption capillaire .....	56
1.3.3.3. Perméabilité aux gaz .....	57
1.3.3.4. Diffusion des ions chlore .....	57
1.3.4. Effet Combiné des additions minérales et de la température sur les propriétés des BAP .....	57
1.3.4.1. Fillers Calcaire .....	60
1.3.4.2. Pouzzolane naturelle .....	61
1.3.4.3. Laitier .....	61
1.4. Synthèse de la revue bibliographique .....	63

## ***Chapitre 2 : Caractérisation des matériaux et procédures expérimentales***

2.1. Introduction .....	66
2.2. Caractérisation des matériaux utilisés .....	66
2.2.1. Ciment .....	66
2.2.2. Additions minérales .....	68
2.2.2.1. Calcaire .....	69
2.2.2.2. Laitier granulé .....	70
2.2.2.3. Pouzzolane naturelle .....	72
2.2.3. Granulats .....	74
2.2.3.1. Sable .....	74
2.2.3.2. Gravier .....	74
2.2.4. Eau de gâchage .....	75
2.2.5. Adjuvant .....	77
2.3. Formulation des bétons autoplacants .....	77
2.3.1. Formulation du Mortier autoplaçant .....	78
2.3.1.1. Rapport Sable / Mortier (S/M) .....	78
2.3.1.2. Ajustement des rapports eau/ciment (E/C) et superplastifiant/ciment (SP/C) .....	79
2.3.2. Formulation du BAP de référence .....	79
2.3.3. Formulation des BAP à base d'addition minérale .....	80
2.4. Confection et conservation des éprouvettes .....	81
2.4.1. Procédure de malaxage .....	82
2.4.1.1. Cas de mortier .....	82

2.4.1.2. Cas de béton .....	83
2.4.2. Confection et conservation des éprouvettes .....	83
2.5. Protocole expérimental .....	85
2.5.1. Essais effectués sur mortier frais.....	85
2.5.1.1. Essai d'étalement au mini-cône .....	86
2.5.1.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel test) .....	86
2.5.1.3. Essai au rhéomètre .....	87
2.5.1.4. Essai de la chaleur d'hydratation .....	89
2.5.2. Essais effectués sur Béton frais .....	91
2.5.2.1. Essai d'étalement (flow test) .....	92
2.5.2.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test) .....	93
2.5.2.3. Essai à la boîte en L (L-Box test) .....	94
2.5.2.4. Essai de ségrégation dynamique au tamis .....	95
2.5.2.5. Masse volumique .....	96
2.5.3. Caractéristiques mécaniques .....	97
2.5.3.1. Résistance à la compression .....	97
2.5.3.2. Résistance à la traction par flexion .....	98
2.5.3.3. La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (VU) .....	99
2.5.3.4. Module d'élasticité instantané .....	101
2.5.4. Essais de caractérisation physique et de durabilité .....	102
2.5.4.1. Porosité accessible à l'eau .....	102
2.5.4.2. Absorption d'eau par capillarité .....	104
2.6. Synthèse .....	106
2.6.1. Formulation et essais réalisés sur mortier frais .....	107
2.6.2. Formulation et essais réalisés sur béton autoplaçant .....	108

### ***Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et discussions***

3.1. Introduction .....	110
3.2. Composition des bétons autoplaçants .....	110
3.2.1. Détermination des rapports eau sur liant et superplastifiant sur liant .....	111
3.2.2. Formulation des différents bétons autoplaçants .....	112
3.3. Effet des additions minérales sur le comportement des BAP à l'état frais .....	113
3.3.1. Étalement au cône d'Abrams .....	114

3.3.2. Temps d'écoulement $t_{50}$ .....	115
3.3.3. Temps d'écoulement par l'essai d'Entonnoir en V .....	116
3.3.4. Rapport $H_2/H_1$ de l'essai de la Boîte en L (L-Box) .....	117
3.3.5. Résistance à la ségrégation par tamisage.....	118
3.3.6. Maintien d'ouvrabilité.....	119
3.3.7. Les paramètres rhéologiques .....	120
3.3.7.1. Seuil de cisaillement .....	123
3.3.7.2. Viscosité plastique .....	124
3.3.8. Synthèse des résultats à l'état frais .....	125
3.4. Effet des additions minérales sur la chaleur d'hydratation .....	126
3.5. Effet des additions et de la température de cure sur les caractéristiques mécaniques .....	130
3.5.1. Résistance à la compression .....	131
3.5.1.1. Effet des additions .....	131
3.5.1.2. Effet de la température de cure .....	135
3.5.2. Résistance à la traction .....	140
3.5.2.1. Effet des additions .....	140
3.5.2.2. Effet de la température de cure .....	144
3.5.3. Module d'élasticité .....	147
3.5.3.1. Effet des additions .....	148
3.5.3.2. Effet de la température de cure .....	149
3.5.3.3. Relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression .	150
3.5.4. Vitesse ultrasonique .....	151
3.5.4.1. Effet des additions .....	154
3.5.4.2. Effet de la température de cure .....	155
3.5.4.3. Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression .....	155
3.5.5. Synthèse des résultats des caractéristiques mécaniques .....	158
3.6. Effet des additions minérales et de la température de cure sur les propriétés de transfert	159
3.6.1. Porosité accessible à l'eau .....	160
3.6.1.1. Effet des additions .....	160

3.6.1.2. Effet de la température de cure .....	161
3.6.2.3. Relation entre la porosité et la résistance à la compression .....	163
3.6.2. Absorption d'eau par capillarité .....	164
3.6.2.1. Effet des additions .....	165
3.6.2.2. Effet de la température de cure .....	169
3.6.3. Synthèse de résultats des propriétés de transfert .....	173
3.7. Conclusion .....	174
Conclusion Générale et Recommandations	177
Références Bibliographiques	182
Annexes	217
Publication	232



## LISTE DES TABLEAUX

	<i>Page</i>
<b>Tableau 1.1 :</b> Propriétés d'ouvrabilité des BAP .....	9
<b>Tableau 1.2 :</b> Résultats d'un essai d'écaillage (résistance au gel-dégel) d'un BAP et un béton vibré .....	24
<b>Tableau 2.1 :</b> Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CPA CEM I 42.5 utilisé .....	67
<b>Tableau 2.2 :</b> Caractéristiques physico-mécaniques du ciment CPA CEM I 42.5 utilisé ..	67
<b>Tableau 2.3 :</b> Caractéristiques chimiques et physico-mécaniques du calcaire utilisé.....	70
<b>Tableau 2.4 :</b> Caractéristiques chimiques et physico-mécaniques du Laitier utilisé .....	72
<b>Tableau 2.5 :</b> Caractéristiques chimiques et physico-mécaniques de la pouzzolane utilisée	73
<b>Tableau 2.6 :</b> Propriétés physiques d'identification des sables utilisés .....	76
<b>Tableau 2.7 :</b> Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés .....	77
<b>Tableau 2.8 :</b> Séquence de malaxage du mortier autoplaçant .....	83
<b>Tableau 2.9 :</b> Séquence de malaxage du béton autoplaçant .....	83
<b>Tableau 3.1 :</b> Composition et résultats des essais sur mortiers pour différentes valeurs d'E/C et SP/C .....	111
<b>Tableau 3.2 :</b> Composition des différents bétons autoplaçants .....	113
<b>Tableau 3.3 :</b> Valeurs de la chaleur dégagée pour les différents mélanges en fonction du temps .....	136
<b>Tableau 3.4 :</b> Vitesse ultrasonique des différents BAP à différentes températures de cure en fonction de l'âge (m/s) .....	151
<b>Tableau 3.5 :</b> Caractéristiques relatives à l'absorption capillaire des BAP à l'âge de 28 jours .....	164

## LISTE DES FIGURES

	<i>Page</i>
<b>Figure 1.1 :</b> Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures ....	8
<b>Figure 1.2 :</b> Exemple des comportements rhéologiques pour différent type de béton.....	11
<b>Figure 1.3 :</b> Dispersions des granulats par excès de pâte .....	13
<b>Figure 1.4 :</b> Action des superplastifiants- défloculation des grains de ciment.....	14
<b>Figure 1.5 :</b> Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle.....	15
<b>Figure 1.6 :</b> Perméabilité à l'état sec d'un béton autoplaçant et un béton vibrée .....	21
<b>Figure 1.7 :</b> Perte de masse de deux BAP et un béton vibré pendant un test d'écaillage .....	24
<b>Figure 1.8 :</b> Représentation de principales additions minérales ajoutés dans un diagramme $SiO_2 - CaO - Al_2O_3$ .....	27
<b>Figure 1.9 :</b> Illustration de l'effet fillers .....	32
<b>Figure 1.10 :</b> Evolution du diamètre d'étalement au mini-cône en fonction du dosage en superplastifiant et pourcentage d'ajout en fillers calcaires .....	33
<b>Figure 1.11 :</b> Evolution des résistances à la compression des pâtes autoplaçantes en fonction du pourcentage de calcaire .....	35
<b>Figure 1.12 :</b> Influence de la nature de l'ajout sur le retrait des bétons pour un E/C de 0,3 ...	37
<b>Figure 1.13 :</b> Evolution de la porosité des pâtes autoplaçantes en fonction du pourcentage de calcaire .....	38
<b>Figure 1.14 :</b> Résistance à la compression du béton en fonction de la surface spécifique Blaine de la pouzzolane de Béni-Saf .....	50
<b>Figure 1.15 :</b> Evolution du retrait total des mortiers pouzzolaniques .....	51
<b>Figure 1.16 :</b> Résistance à la compression du béton en fonction du pourcentage d'addition et mode de cure .....	58
<b>Figure 1.17 :</b> Evolution des résistances à 16h, 7j et 28j avec l'élévation de la température de cure d'un BAP incorporant un ciment CEM III/A .....	63
<b>Figure 2.1 :</b> Analyse chimique par DRX du ciment utilisé.....	67
<b>Figure 2.2 :</b> Broyeur à boulets .....	68

<b>Figure 2.3 :</b>	Broyeur à disque .....	68
<b>Figure 2.4 :</b>	Additions minérales utilisées .....	69
<b>Figure 2.5 :</b>	Structure morphologique des grains de calcaire .....	69
<b>Figure 2.6 :</b>	Analyse chimique par DRX du filler calcaire utilisé .....	70
<b>Figure 2.7 :</b>	Structure morphologique des grains de laitier. ....	71
<b>Figure 2.8 :</b>	Analyse chimique par DRX du laitier d'El Hadjar utilisé.....	71
<b>Figure 2.9</b>	Structure morphologique des grains de la pouzzolane. ....	73
<b>Figure 2.10 :</b>	Analyse chimique par DRX de la pouzzolane de Beni Saf.....	74
<b>Figure 2.11 :</b>	Sable fin de Hassi Bahbah. ....	75
<b>Figure 2.12 :</b>	Sable grossier de Mont Guorno. ....	75
<b>Figure 2.13 :</b>	Gravier de Mont Guorno 3/8. ....	75
<b>Figure 2.14 :</b>	Gravier de Mont Guorno 8/15.....	75
<b>Figure 2.15 :</b>	Courbes granulométriques des granulats utilisés.....	76
<b>Figure 2.16 :</b>	Essai d'Étalement pour Mortier .....	86
<b>Figure 2.17 :</b>	Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier .....	87
<b>Figure 2.18 :</b>	Dispositif du rhéomètre utilisé .....	88
<b>Figure 2.19 :</b>	Profil de vitesse utilisé pour l'essai rhéométrique .....	89
<b>Figure 2.20 :</b>	Essai calorimétrique pour mesurer la chaleur d'hydratation. ....	91
<b>Figure 2.21 :</b>	Mesure du diamètre d'étalement. ....	92
<b>Figure 2.22 :</b>	Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel). ....	93
<b>Figure 2.23 :</b>	Essai de la boîte en L. ....	94
<b>Figure 2.24 :</b>	Essai de stabilité dynamique au tamis.....	96
<b>Figure 2.25 :</b>	Mesure de la masse volumique du béton frais.....	97
<b>Figure 2.26 :</b>	Machine d'essai de compression.....	98

<b>Figure 2.27 :</b>	Essai de traction par flexion.....	98
<b>Figure 2.28 :</b>	Mesure de la vitesse ultrasonique.....	100
<b>Figure 2.29 :</b>	Dispositif pour mesure du module d'élasticité sur béton.....	101
<b>Figure 2.30 :</b>	Dessiccateur pour mettre les éprouvettes sous vide.....	102
<b>Figure 2.31 :</b>	Pesée hydrostatique des échantillons pour l'essai de porosité.....	103
<b>Figure 2.32 :</b>	Dispositif expérimental pour mesurer l'absorption d'eau par capillarité.....	105
<b>Figure 2.33 :</b>	Variables étudiées et essais réalisés sur mortiers autoplaçants.....	107
<b>Figure 2.34 :</b>	Formulation et caractérisation des BAP à l'état frais et durci.....	108
<b>Figure 3.1 :</b>	Diamètre d'étalement du BAP en fonction de type d'addition .....	114
<b>Figure 3.2 :</b>	Temps $t_{50}$ au cône d'Abrams des BAP en fonction du type d'addition .....	116
<b>Figure 3.3 :</b>	Temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du type d'addition .....	117
<b>Figure 3.4 :</b>	Rapport $H_2/H_1$ de l'essai à la Boîte en L (L-Box) en fonction du type d'addition .....	118
<b>Figure 3.5 :</b>	Indice de ségrégation des différents BAP en fonction du type d'addition .....	119
<b>Figure 3.6 :</b>	Évolution du diamètre d'étalement des différents BAP en fonction du temps ..	120
<b>Figure 3.7 :</b>	Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour le MAPT.	121
<b>Figure 3.8 :</b>	Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour le MAPC	121
<b>Figure 3.9 :</b>	Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour le MAPL	122
<b>Figure 3.10 :</b>	Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour le MAPP	122
<b>Figure 3.11 :</b>	Seuil de cisaillement des différents mortiers autoplaçants .....	123
<b>Figure 3.12 :</b>	Viscosité plastique des différents mortiers autoplaçants .....	124
<b>Figure 3.13 :</b>	Variation de la température des différents mélanges en fonction du temps .....	127
<b>Figure 3.14 :</b>	Quantité de chaleur dégagée pour les différents mélanges en fonction du temps .....	128
<b>Figure 3.15 :</b>	Résistance à la compression en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 20°C .....	132

<b>Figure 3.16 :</b>	Résistance à la compression en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 40°C .....	132
<b>Figure 3.17 :</b>	Résistance à la compression en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 60°C .....	133
<b>Figure 3.18 :</b>	Résistance à la compression en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 80°C .....	133
<b>Figure 3.19 :</b>	Résistance à la compression en fonction de l'âge et température de cure du BAPT .....	136
<b>Figure 3.20 :</b>	Résistance à la compression en fonction de l'âge et température de cure du BAPC .....	136
<b>Figure 3.21 :</b>	Résistance à la compression en fonction de l'âge et température de cure du BAPL .....	137
<b>Figure 3.22 :</b>	Résistance à la compression en fonction de l'âge et température de cure du BAPP .....	137
<b>Figure 3.23 :</b>	Résistance à la traction en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 20°C .....	141
<b>Figure 3.24 :</b>	Résistance à la traction en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 40°C .....	141
<b>Figure 3.25 :</b>	Résistance à la traction en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 60°C .....	142
<b>Figure 3.26 :</b>	Résistance à la traction en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 80°C .....	142
<b>Figure 3.27 :</b>	Résistance à la traction en fonction de l'âge et température de cure du BAPT.	145
<b>Figure 3.28 :</b>	Résistance à la traction en fonction de l'âge et température de cure du BAPC.	145
<b>Figure 3.29 :</b>	Résistance à la traction en fonction de l'âge et température de cure du BAPL	146
<b>Figure 3.30 :</b>	Résistance à la traction en fonction de l'âge et température de cure du BAPP	146
<b>Figure 3.31 :</b>	Module d'élasticité à 28 jours des différents BAP en fonction de la température de cure .....	148
<b>Figure 3.32 :</b>	Module d'élasticité à 28jours en fonction de type d'addition .....	149
<b>Figure 3.33 :</b>	Relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression à 28 jours .....	150

<b>Figure 3.34 :</b>	Vitesse ultrasonique en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 20°C .....	152
<b>Figure 3.35 :</b>	Vitesse ultrasonique en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 40°C .....	152
<b>Figure 3.36 :</b>	Vitesse ultrasonique en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 60°C .....	153
<b>Figure 3.37 :</b>	Vitesse ultrasonique en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 80°C .....	153
<b>Figure 3.38 :</b>	Corrélation entre les résistances à la compression et les vitesses ultrasoniques des différents BAP en fonction de type d'addition .....	156
<b>Figure 3.39 :</b>	Corrélation entre les résistances à la compression et les vitesses ultrasoniques des différents BAP en fonction de la température de cure .....	157
<b>Figure 3.40 :</b>	Porosité accessible à l'eau à 28 jours en fonction de type d'addition .....	160
<b>Figure 3.41 :</b>	Porosité accessible à l'eau à 28 jours en fonction de type d'addition minérale .....	162
<b>Figure 3.42 :</b>	Relation entre la porosité ouverte et la résistance en compression de tous les BAP mesurées à 28 jours .....	163
<b>Figure 3.43 :</b>	Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours des différents BAP conservés à 20°C .....	165
<b>Figure 3.44 :</b>	Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours des différents BAP conservés à 40°C .....	166
<b>Figure 3.45 :</b>	Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours des différents BAP conservés à 60°C .....	166
<b>Figure 3.46 :</b>	Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours des différents BAP conservés à 80°C .....	167
<b>Figure 3.47 :</b>	Sorptivité des différents BAP à l'âge de 28 jours en fonction de la température de cure .....	168
<b>Figure 3.48 :</b>	Absorption d'eau par capillarité du BAPT à l'âge de 28 jours en fonction de la température de cure .....	169
<b>Figure 3.49 :</b>	Absorption d'eau par capillarité du BAPC à l'âge de 28 jours en fonction de la température de cure .....	170
<b>Figure 3.50 :</b>	Absorption d'eau par capillarité du BAPL à l'âge de 28 jours en fonction de la température de cure .....	170

<b>Figure 3.51 :</b>	Absorption d'eau par capillarité du BAPP à l'âge de 28 jours en fonction de la température de cure .....	171
<b>Figure 3.52 :</b>	Sorptivité à l'âge de 28 jours des différents BAP en fonction de la température de cure .....	172

## LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATION

<b>ADV</b>	Agent de viscosité
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Oxyde d'aluminium
<b>BAP</b>	Béton autoplaçant
<b>BAPC</b>	Béton autoplaçant à base de calcaire
<b>BAPL</b>	Béton autoplaçant à base de laitier des hauts fourneaux
<b>BAPP</b>	Béton autoplaçant à base de la pouzzolane naturelle
<b>BAPT</b>	Béton autoplaçant sans addition
<b>BHP</b>	Béton de haute performance
<b>BO</b>	Béton ordinaire
<b>BV</b>	Béton vibré
<b>C2S</b>	Silicate bibasique
<b>C3A</b>	Aluminate tricalcique
<b>C3S</b>	Silicate tricalcique
<b>C4AF</b>	Alumino-Ferrite- Tétracalcique
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Hydroxyde de calcium ou portlandite
<b>CaO</b>	Carbonate de Calcium ou Calcaire
<b>cm</b>	Centimètre
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de calcium
<b>CPA</b>	Ciment portland artificiel
<b>CSH</b>	Hydroxyde de calcium
<b>D<sub>étal</sub></b>	Diamètre d'étalement
<b>D<sub>max</sub></b>	Diamètre maximal
<b>E<sub>ij</sub></b>	Module de déformation longitudinale instantanée
<b>E/C</b>	Eau sur ciment
<b>E/P</b>	Eau sur poudre
<b>f<sub>ck</sub></b>	Résistance à la compression
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Oxyde ferrique
<b>f<sub>s</sub></b>	Résistance à la traction
<b>g</b>	Gramme
<b>g/l</b>	Gramme par litre
<b>G/S</b>	Gravier sur sable
<b>H</b>	Hauteur



<b>HR</b>	Humidité relative
<b>j</b>	Jours
<b>K<sub>2</sub>O</b>	Oxyde de potassium
<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	Kilogramme par mètre cube
<b>LS</b>	Les lignosulfonates modifiés
<b>m/s</b>	Mètre par second
<b>m<sup>2</sup>/s</b>	Mètre carré par second
<b>MAP</b>	Mortier autoplaçant
<b>MgO</b>	Oxyde de magnésium
<b>ml/cm<sup>2</sup></b>	Millilitre par centimètre carré
<b>mm</b>	Millimètre
<b>MPa</b>	Méga pascal.
<b>M<sub>VR</sub></b>	Masse volumique relative
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	Oxyde de sodium
<b>Pa</b>	Pascal
<b>Pa.s<sup>-1</sup></b>	Pascal par second
<b>PC</b>	Polyacrylate
<b>PMS</b>	Le polymère de mélamine sulfonate
<b>PNS</b>	Le polymère de naphthalène sulfonate
<b>PZN</b>	Pouzzolane naturelle
<b>R<sub>m</sub></b>	La vitesse relative d'écoulement
<b>s</b>	Second
<b>SCC</b>	Self compacting concrète (béton autoplaçant)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de silicium
<b>SO<sub>3</sub></b>	Trioxyde de soufre
<b>SP</b>	Superplastifiant
<b>SSB</b>	Surface spécifique de Blaine
<b>T</b>	Température
<b>t</b>	Temps
<b>V<sub>i</sub></b>	La proportion volumique des granulats de taille di
<b>VPO</b>	Vitesse de propagation des ondes ultrasonique
<b>γ</b>	La vitesse de déformation
<b>Γ<sub>m</sub></b>	L'étalement relatif
<b>η<sub>p</sub></b>	La viscosité plastique
<b>μm</b>	Micromètre

$\tau$  Taux de cisaillement  
 $\tau_i$  Seuil de cisaillement initial

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### Contexte Général

Le béton autoplaçant (BAP) constitue une nouvelle avancée pour la construction en béton. Il se distingue par une fluidité extrême, permettant sa mise en place sans vibration. Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes et permet ainsi la réalisation de formes compliquées ou d'ouvrage à densité d'armatures élevée tout en présentant généralement des surfaces de meilleure qualité. Ces prouesses accrues à l'état frais sont obtenues indépendamment des performances à l'état durci.

Par ailleurs, les bétons peuvent être exposés à des températures élevées soit dans les conditions climatiques extrêmes, dans le cas du béton de masse 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 adéquate dans ces conditions.

En outre, les BAP se caractérisent par une formulation différente à celle du béton ordinaire qui lui confie une grande fluidité. L'obtention de l'autoplaçance est rendue possible en utilisant un plus grand nombre de constituants comparativement aux bétons traditionnels vibrés. La composition des BAP se caractérise par un volume élevé de pâte et un volume faible de granulats, ce qui assure la bonne dispersion des gros granulats sans aucune tendance à la ségrégation.

Face à la problématique liée à l'utilisation du ciment seul comme liant dans les BAP ( $450$  à  $600 \text{ kg/m}^3$ ), une solution judicieuse consiste à utiliser des additions minérales telles que la pouzzolane naturelle, la poudre de calcaire et le laitier granulé des hauts fourneaux. L'emploi de ces matériaux comme additions 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.

Bien que les avantages des BAP soient concrets, et que l'intérêt qu'ils suscitent chez les industriels soit grandissant, l'utilisation des BAP demeure faible en Algérie, 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 dans le climat algérien où la température excède les 40°C, ainsi que son comportement vis-à-vis des températures de cure élevées nécessitent donc d'apporter des résultats de recherches qui répondent à ces questions.

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

Un BAP incorporera une quantité élevée de fines (500 kg/m<sup>3</sup> en moyenne) composée de ciment et d'addition minérale et une quantité d'eau relativement faible. La fluidité souhaitée sera atteinte en introduisant des additions chimiques telles que les superplastifiants. Par conséquent, l'effet de la température peut être plus grand sur les BAP que sur le béton conventionnel, étant donné, le nombre plus important de constituants et implicitement de la complexité des interactions entre ces constituants, et que la température influence la pâte (réactions chimiques) plus que les granulats. La principale interrogation qui se pose est de savoir si les températures qui prévalent en situation du temps chaud ont la même incidence sur les propriétés du béton autoplaçant que sur celles du béton vibré

### But de travail

Le climat algérien se distingue par la différence de la température qui arrive à plus de 40°C en été et des températures négatives en période d'hiver. Ce qui laisse le chercheur dans le souci du sort du mélange de béton surtout que ce dernier est un mélange hétérogène et en plus pour les BAP. En outre, la présence de certaines additions minérales en substituant le ciment dans les BAP, peut modifier la cinétique d'hydratation et minimiser les désordres causés par une élévation de température en fonction des caractéristiques de ces additions et de leurs taux de substitution. Donc, les additions minérales ajoutent un souci supplémentaire au souci de l'effet de variation de la température. Suit à cet environnement est survenue l'idée d'étudier l'effet de l'élévation de la température de cure sur les bétons autoplaçants contenant des additions minérales.

Dans la littérature, et depuis la découverte des BAP, de nombreuses recherches ont été réalisées, notamment sur sa formulation ainsi sur l'effet d'incorporation des additions minérales sur son comportement à l'état frais et durci à température ambiante. Cependant, peu de travaux sont effectués sur l'influence des températures élevées sur la maturation et le comportement de ces BAP incorporant ou non des additions minérales.

L'objectif essentiel de la présente recherche est donc d'étudier l'effet de l'élévation des températures de cure sur le comportement des bétons autoplaçants à différentes échéances en exploitant des matériaux locaux. Précisément le laitier des hauts fourneaux, les fillers calcaires et la pouzzolane naturelle, et dans des conditions normales et avec une cure thermique sous une plage de température varie entre 20 et 80°C.

Dans le but d'apporter des éléments scientifiques pour la définition d'une méthodologie de formulation avec additions minérales et afin de permettre une optimisation de leur utilisation et l'amélioration des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants sous conditions climatiques extrêmes, nous avons lancé une étude expérimentale afin de quantifier les modifications apportées, sur l'évolution des résistances mécaniques et celle des propriétés de transport, par la présence de différentes substances minérales dans la formulation d'un BAP durcissant sous différentes températures de cure.

### Plan de travail

Afin d'apporter des éléments de réponse à la problématique posée dans ce travail, notre manuscrit est présenté en trois chapitres :

Après avoir présenté une introduction générale montrant la problématique et l'objectif visé, une synthèse bibliographique est abordée au premier chapitre. Elle expose dans un premier temps le concept et la formulation des bétons autoplaçants, ainsi que l'influence des principaux constituants sur les propriétés des BAP, notamment l'effet des additions minérales. Dans un second temps, nous présentons les effets de l'élévation de la température de cure sur les caractéristiques des BAP incorporant ou non des additions minérales.

Le deuxième chapitre est destiné en premier lieu à la caractérisation des matériaux entrants 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 une description détaillée des essais de caractérisation à l'état frais et durci du mortier autoplaçant et les différents BAP est donné dans le protocole expérimental.

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 de ses caractéristiques à l'état frais est achevée puis passé à la discussion des effets des additions et de la température de cure sur les propriétés mécaniques et de transport des bétons autoplaçants a l'état durci.

Enfin, nous clôturons notre travail par une conclusion générale, en synthétisant les principaux résultats trouvés sur le comportement d'écoulement, mécanique et celui du transport des différents BAP, en mettant les points sur l'effet des additions minérales et l'élévation de la température de cure. Des perspectives de recherche sont aussi présentées par la suite pour continuer à apporter de nouvelles informations pertinentes à cette problématique.

# **CHAPITRE 1**

## **REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**



**CHAPITRE 1****REVUE BIBLIOGRAPHIQUE****1.1. Etat de connaissances des bétons autoplaçants (BAP)****1.1.1. Définition**

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux qui ont été mis au point au Japon dans les années 80. Ces bétons se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, ils sont caractérisés par une très grande fluidité et peuvent être mis en place et remplir les coffrages sous l'effet de leur poids propre sans apport de vibration externe ou interne tout en restant homogènes (absence de ségrégation) et en garantissant des structures résistantes et durables. Et ceci quel que soit la forme géométrique et le confinement du milieu [1]. Ces bétons possèdent une plage d'utilisation très large : des résistances couvrant la gamme des bétons ordinaires aux bétons à hautes performances, mais également des utilisations diverses (de l'habitation aux ouvrages d'art ainsi les travaux de réhabilitation). Depuis, son apparition, ce béton ne cesse de s'étendre dans le monde en raison de ses avantages tant au niveau environnemental, technologique qu'économique qui intéressent de plus en plus les industriels [2].

- Diminution du temps de réalisation lors de la mise en place du béton sur chantier,
- Diminution de la pénibilité du travail sur chantier,
- Possibilités techniques nouvelles : coulage de zones fortement ferrillées, dans des coffrages à géométrie complexe ou très encombrée, réparation de zones difficilement accessibles.

En Algérie, ce type de béton présente un intérêt certain puisque les impératifs d'une meilleure qualité des ouvrages et aussi la complexité des coffrages commencent à se sentir de plus en plus ces dernières années.

### 1.1.2. Propriétés clés des BAP

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. Par comparaison aux bétons ordinaires, les bétons autoplaçants sont caractérisés à l'état frais par trois propriétés principales : une grande capacité au remplissage (déformabilité), une grande capacité au passage et une grande résistance à la ségrégation aussi bien au repos qu'en écoulement [3, 4].

#### 1.1.2.1. Capacité au passage (déformabilité)

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le BAP est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations (vibrations externes ou internes) [5]. 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 et la vitesse d'écoulement du béton [6]. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects, puisque le diamètre final atteint par la galette de béton correspond à la capacité de déformation, et le temps de passage à un certain diamètre (à 50 cm de diamètre par exemple) correspond à la vitesse de la déformation du béton [7].

#### 1.1.2.2. Résistance à la ségrégation (stabilité)

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation des phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [8, 9]. 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 [10]. Cette caractéristique peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

Pour éviter la ségrégation, il faut donc réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant son rapport E/C. 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. Khayat et Tang [11] ont rapporté que le BAP ne doit présenter aucun signe de ségrégation que ce soit sous conditions dynamiques (ressuage de l'eau, ségrégation des gravillons) ou statiques (mauvaise distribution de gros granulats du béton durci). L'essai préconisé pour tester la résistance à la ségrégation des BAP est l'essai au tamis de 5 mm [7].

### 1.1.2.3. Capacité au passage

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité au remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés et les zones fortement ferraillées, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de ces derniers dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement [7]. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la figure 1.1 qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

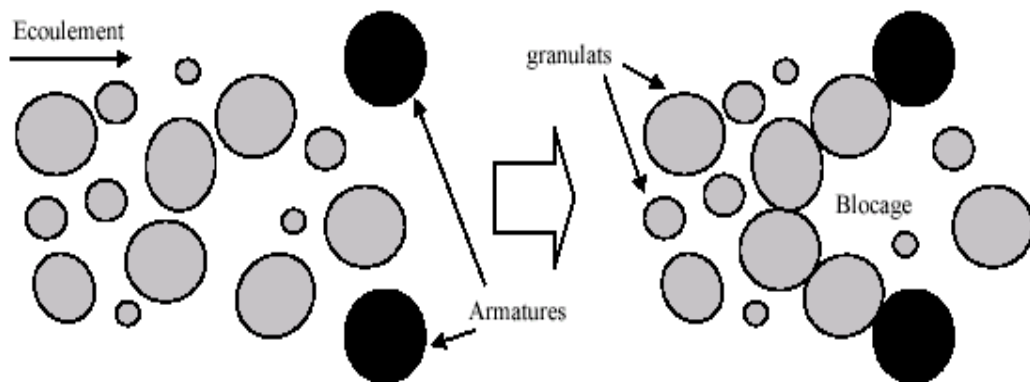


Figure 1.1 : Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures [6].

Selon l'explication du phénomène par El Barrak [6], 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. 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.

Donc, un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation. Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP

Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Actions à mener dans la formulation
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation des superplastifiants
		Optimisation du rapport E/C
Résistance à la ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Réduction du rapport E/C
		Utilisation de matériaux de grande surface
		Utilisation d'agents de viscosité
	Réduction de la séparation de phases	Réduction du rapport E/C
		Utilisation d'agents de viscosité
		Réduction de la taille maximale des granulats
Capacité de passage	Réduction de blocage des granulats	Réduction du volume de gravier
		Réduction de la taille maximale des granulats

En général, il est assez difficile à rencontrer les trois caractères en même temps, pour cela de nombreux essais sont optimisés pour une utilisation sur chantier et d'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 [12, 13], par De Schutter en 2005 [14] et enfin par l'AFGC dans le cadre du Projet National Béton Autoplaçant en 2008 [7]. 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 [15].

### 1.1.3. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP

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 (Fig. 1.2) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement  $\tau_0$ . Le fluide est considéré comme Binghamien si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation :

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

Avec  $\tau$  la contrainte de cisaillement (Pa),  $\tau_0$  le seuil de cisaillement (Pa),  $\eta_p$  la viscosité plastique (Pa.s<sup>-1</sup>) et  $\dot{\gamma}$  la vitesse de déformation (s<sup>-1</sup>).

Ces grandeurs (seuil de cisaillement et 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 [16]:

- le viscosimètre a plaque parallèle BML,
- le rhéomètre coaxial BTRheom,
- 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.

En ce qui concerne les bétons autoplaçants, des auteurs [17] ont montré que leur équation de comportement suit le modèle de Herschel-Bulkley dont l'équation de comportement est présentée par l'équation 1.2 suivante. Toutefois, ce modèle est plus exigeant que celui de Bingham car il nécessite la détermination d'un paramètre supplémentaire.

$$\tau = \tau_0 + a \gamma^b \quad (1.2)$$

Avec  $a$  et  $b$  sont des constantes de comportement.

Les BAP sont caractérisés par un couple seuil de cisaillement - viscosité plastique un peu particulier, puisque ces deux propriétés sont principalement liées à la stabilité du béton. En effet, lorsque la viscosité plastique du béton est très faible, le seuil de cisaillement doit être un peu grand pour assurer la stabilité du mélange. Si la viscosité plastique est grande, le seuil de cisaillement nécessite d'être proche de zéro pour la même raison [18]. En conséquence, une composition de BAP basée sur l'optimisation de ce couple permet de satisfaire le critère de stabilité du BAP.

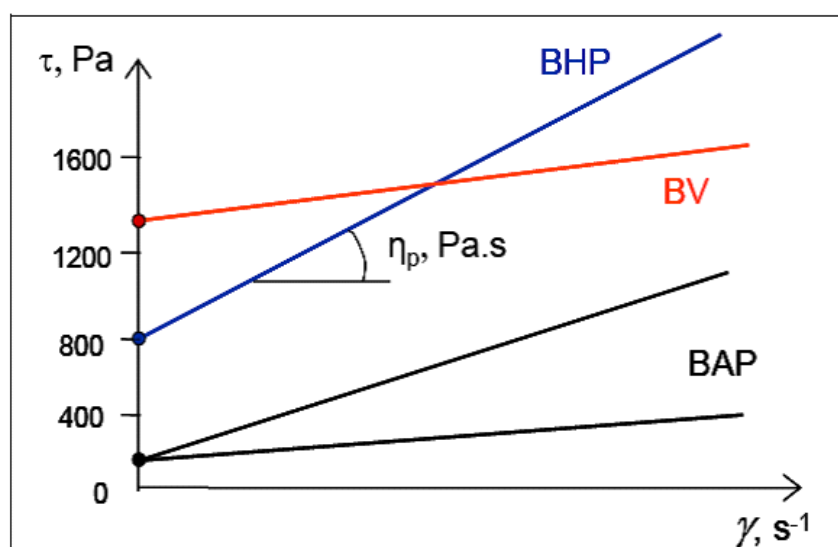


Figure 1.2 : Exemple des comportements rhéologiques pour différents type de béton [16].

Par comparaison au béton normal (BN) et béton à haute résistance (BHR), le BAP possède un faible seuil de cisaillement, alors que sa viscosité plastique est presque similaire à celle du premier, et moins par rapport à la seconde [19] (Fig. 1.2). Concernant les valeurs des deux propriétés rhéologiques, Wallevik [19] a rapporté que les BAP présentent un seuil de cisaillement variant entre 7 et 160 Pa, et une viscosité plastique comprise entre 0 et 60 Pa.s. De Larrard [20] a rapporté que pour assurer l'aptitude auto-nivelant du BAP, le seuil de cisaillement doit être limité à 500 Pa. Pour la viscosité plastique, le même auteur a montré qu'il faut la limiter entre 200 et 300 Pa.s, pour améliorer la pompabilité du BAP.

#### 1.1.4. Spécificités de composition des BAP

Formuler un BAP, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondants à un cahier des charges donné. Ce cahier des charges concerne les caractéristiques à l'état frais (la capacité au remplissage, la capacité au passage, la résistance à la ségrégation et la stabilité), et à l'état durci (la résistance du BAP à 28jours et la durabilité). Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme par exemple, une prise accélérée ou retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale. Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO.

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques [21], soit :

##### 1.1.4.1. Un grand volume de pâte

Il est connu que les frottements intergranulaires diminuent l'ouvrabilité des bétons [22]. Afin de permettre une bonne déformabilité des BAP et un remplissage correct des coffrages, un volume important de pâte doit être maintenu. Son rôle est de couvrir la surface des granulats afin de diminuer les frictions entre les particules, favoriser la dispersion des granulats et conférer au matériau sa fluidité (Fig. 1.3).

Selon l'AFGC [7], ce volume doit être compris entre 330 et 400 l/m<sup>3</sup>. Ouchi et Edamatsu [23] ont observé que moins il y a de frottements entre les grains de sable, plus le mortier s'écoule facilement et donc plus le béton lui-même s'écoule facilement.

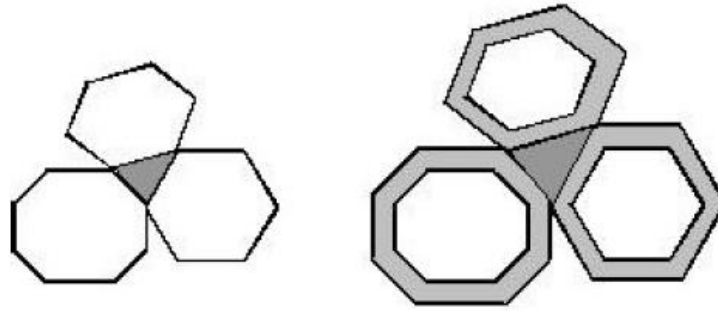


Figure 1.3 : Dispersions des granulats par excès de pâte [24].

#### 1.1.4.2. Une quantité de fines importante

Afin de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines supérieure à celle des bétons conventionnels (de l'ordre de  $500 \text{ kg/m}^3$ ). Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes et un coût de formule trop élevé.

Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice, pouzzolane naturelle et filler calcaire. Ces additions sont moins réactives à court terme que le ciment, ce qui permet de disposer d'un temps prolongé d'ouvrabilité. En outre, l'introduction de ces additions entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton [25]. Le choix d'une addition minérale et sa teneur dépend donc, des exigences de résistance à la compression à 28 jours, d'ouvrabilité et des conditions d'exposition du BAP [26].

#### 1.1.4.3. L'emploi de superplastifiants

L'apparition des BAP est étroitement liée aux avancées technologiques réalisées dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants [27-28]. Ces derniers sont composés de polymères à chaînes macromoléculaires qui permettent l'obtention de la fluidité et la diminution des frottements intergranulaires.



Les superplastifiants permettent en effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentées à la surface des grains, et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues [29]. L'eau initialement piégée entre les floccs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (Fig. 1.4). Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place.

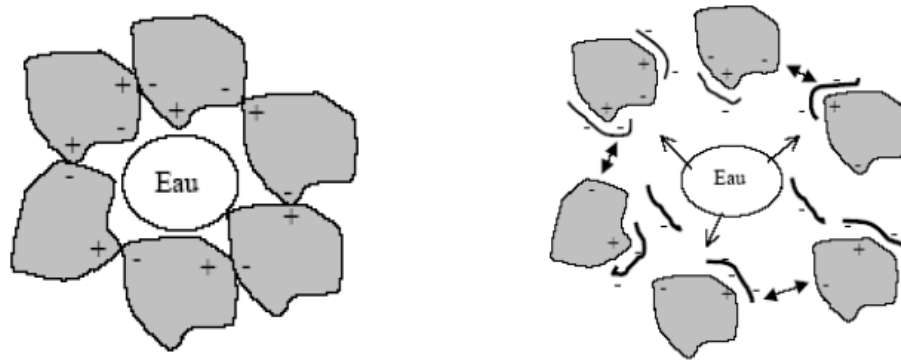


Figure 1.4 : Action des superplastifiants- Défloculation des grains de ciment [30].

#### 1.1.4.4. L'utilisation d'un agent de viscosité

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP peuvent contenir un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci [31].

L'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et limiter les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [1]. Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. Donc pour formuler un BAP, il faut s'assurer que le couple agent de viscosité-superplastifiant est compatible et que leur dosage est optimal.

#### 1.1.4.5. Un faible volume de gravillon

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés de diamètre maximal  $D_{max}$  compris entre 10 et 20 mm [7]. Toutefois, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée (Fig. 1.5) [32]. D'un autre côté, la présence de gravillons conduit par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton. Ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée. En général, on admet un rapport massique gravillon / sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée. Dans la majorité des cas, l'augmentation du  $D_{max}$  conduit à des risques de blocages [7].

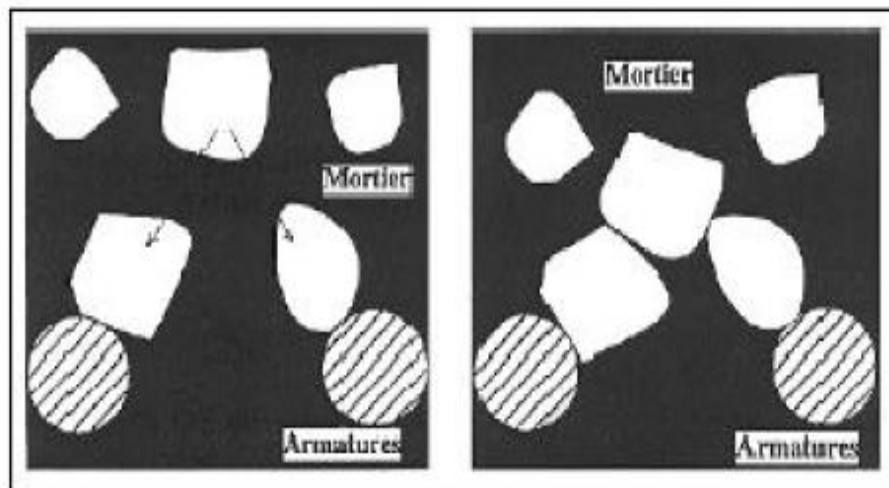


Figure 1.5 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [32].

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes. Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

#### 1.1.5. Propriétés physico-mécaniques et durabilité des BAP

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

#### 1.1.5.1. Résistance à la compression

Les différentes études de la littérature qui concernent les principaux travaux réalisés sur la résistance mécanique des BAP révèlent que pour un rapport eau/liant similaire, les BAP développent une résistance mécanique en compression égale et parfois même légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires vibrés [26, 33, 34]. La raison à cette différence est liée à la composition des BAP, et notamment le faible rapport E/P (0,28 à 0,42) et une teneur en poudre élevée (450 à 600 kg/m<sup>3</sup>), l'utilisation des additions minérales, ainsi qu'un dosage en superplastifiant plus élevé que les bétons vibrés [33, 35-38].

Aux très jeunes âges, les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de superplastifiant, car un dosage trop élevé peut 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 [33].

Domone [34] 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). Turcry et al. [38] montrent que le volume de pâte 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 pâte à 57%. De même, Pineaud [37] constate aussi que le volume de pâte a une faible influence sur la résistance en compression.

#### 1.1.5.2. Résistance à la traction

En général, la résistance à la traction dépend de la résistance à la compression. 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 supérieure à celle des bétons vibrés, la résistance à la traction des BAP est également supérieure [12, 39-41].

Klug et Holschemacher [33] ont trouvé que la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés (augmentation allant jusqu'à 40%). Par contre, et en raison de la liaison granulats-pâte plus faible causée par l'emploi des différents types du superplastifiant ou un dosage élevé de fines dans les BAP, Parra et al. [42], ont montré que la résistance à la traction est faible dans les BAP qu'en BV. Selon le même auteur, il a été montré que l'utilisation d'un superplastifiant type polycarboxylate affaiblit la zone de transition granulats-pâte et résulte en une faible résistance en traction.

Le rapport entre la résistance à la traction et à la compression des BAP est a priori similaire à celui des bétons vibrés BV [30]. Dans leur article sur les BAP légers à haute résistance, Choi et al. [43] 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.

#### 1.1.5.3. Module 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 lié à la résistance à la compression du béton. En effet, l'augmentation de la résistance à la compression mène vers l'augmentation du module d'élasticité [44]. Nassif et al. [45] 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.

En outre, le module élastique du béton dépend des proportions volumiques de ses constituants et de leur module respectif. Les BAP sont formulés de telle sorte à ce que le volume de la pâte soit plus important et les proportions granulaires plus faibles que les BV [30, 46]. En effet, le module des BAP diffère peu de celui des BV si le rapport G/S est similaire et est inférieur à 1. Si le rapport G/S est plus élevé pour le BV que pour le BAP, il en découle des valeurs du module d'élasticité des bétons autoplacants plus faibles que celles des bétons vibrés auxquels ils sont comparés.

Selon certains auteurs [6, 26, 47], les modules d'élasticité des BAP ne diffèrent pas significativement de ceux du béton ordinaire pour la même classe de résistance. Contrairement, Assié et al. [16], ont trouvé que, même si les BAP présentaient une meilleure résistance à la compression que les bétons ordinaires, la quantité plus élevée de pâte dans ces derniers ainsi le faible volume et la taille maximale réduite des gravillons a généré une

réduction dans leur module d'élasticité, ce qui peut être expliqué par le fait que la dureté des gravillons est plus grande que celle de la pâte. Ceci est affirmé aussi par Larrard et al. [17], Turcry et al. [38], Felekoglu et al. [40], Benkechkech [48] et Sedran [49].

Domone [50] a montré que le module d'élasticité des BAP peut être jusqu'à 40% plus faible que celui correspondant aux BV et cela à des faibles valeurs de résistance en compression ( $\approx 20$  MPa), mais cette différence décroît jusqu'au moins de 5% à des valeurs de résistance élevée (90-100 MPa). De même Craeye et al. [51] ont montré également que le module d'élasticité des BAP semble être très similaire à ce du BO.

Pons et al. [52] 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 quatre 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 des règlements.

#### 1.1.5.4. Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques

La vitesse ultrasonique (VU) 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 VU et par conséquent la qualité du béton. En général, les BAP présentent des VU élevées allant dans certains cas à 5000 m/s, ce qui peut être dû au fait que les BAP sont formulés avec une teneur en fines élevée qui rend leur microstructure plus dense et leurs pores plus petites. C'est pour cette raison que les BAP possèdent d'excellentes qualités [44, 53, 54].

#### 1.1.5.5. Retrait

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique est directement liée au rapport E/C. Le retrait endogène d'un béton est d'autant plus important que son rapport E/C est faible. Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP, La comparaison entre BV et BAP à température ambiante conduit à des résultats controversés.

Des auteurs ont montré que le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [52, 55]. Vieira et Bettencourt [56] et Pons et al. [52], contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton. D'autres auteurs comme Hu et Barbieri [57] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés. Contrairement au Lee et al. [58] qui ont mentionné que le retrait endogène est plus important dans les BAP que dans les bétons ordinaires, en raison du retrait chimique élevé ainsi qu'aux fines pores dans les bétons au laitier. Du même Ambrosia et al. [59] et Benkechache et al. [60], ont montré que les déformations de retrait (endogène et total) augmentent avec le volume de pâte et un faible rapport E/C dans les BAP.

De nombreux chercheurs ont comparé le retrait de séchage des BAP à celui des bétons conventionnels [12, 61, 62]. Ces chercheurs ont rapporté que le retrait de séchage des BAP est similaire à celui des bétons conventionnels. Persson [47] a rapporté que le retrait de séchage des BAP et bétons vibrés coïncident pour la même classe de résistance. En outre, Sonebi et Bartos [39] ont observé des retraits de séchage des BAP moins importants que ceux des bétons vibrés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est attribué au volume de pâte et au rapport E/L car, d'après Neville [63], augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage.

En ce qui concerne le retrait de dessiccation, les résultats disponibles dans la littérature sont très contradictoires. Hu et Barbieri [57] trouvent des déformations sur les BAP plus importantes que celles mesurées sur des BV, et d'autant plus importantes que le rapport G/S est faible. À résistance mécanique constante, Persson [64] annonce des retraits équivalents pour les deux types de béton. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700  $\mu\text{m}/\text{m}$  (à 180 jours).

#### 1.1.5.6. Durabilité et propriétés de transport

La durabilité des bétons peut être reliée en grande partie à la pénétration d'agents nocifs ( $\text{CO}_2$ , chlorure...). L'étude de la perméabilité des bétons contenant des additions minérales 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. Assié et al. [16, 65] ont confirmé dans leurs

travaux que pour un même niveau de résistance mécanique, les bétons autoplacants sont plus durables que les bétons ordinaires en terme des propriétés physico-chimiques.

#### 1.1.5.6.1. Absorption d'eau

L'eau est la principale cause de la dégradation des constructions. En fait, quand le béton est partiellement ou complètement immergé dans l'eau, celle-ci pénètre à travers les pores en transportant dans certains cas des substances nocives [66]. L'absorption d'eau est généralement liée à la porosité des BAP [67]. Cette caractéristique, est influencée directement par le rapport eau/ciment (E/C), le taux de saturation des pores et la composition du liant, notamment, la nature du ciment et des additions minérales [68, 69].

La formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau inférieure à celles des bétons vibrés [70]. Selon Kapoor et al. [62], la valeur d'absorption d'eau par immersion des BAP est 1% contre 2% pour les bétons vibrés. Et même pour l'absorption capillaire, présente des valeurs inférieures à celles des bétons vibrés et elles sont d'autant plus faibles qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes. Le même résultat a été trouvé aussi par Zhu et Bartos [71], qui ont démontré que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés de classe de résistance équivalente et quelle est d'autant plus faible avec le dosage élevé en cendres volantes.

Contrairement, les résultats trouvés par Boel et al. [72] (cités par Assie [26]), ont montré que l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est analogue à celle des bétons vibrés correspondants. Ces deux grandeurs augmentent avec le rapport E/C, et par la 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.

D'autre part, Oliveira et al. [73] ont étudié la sorptivité des bétons autoplacant et la comparée avec celle d'un béton vibré. L'étude a montré que le comportement des bétons autoplacants, du point de vue absorption d'eau par capillarité, représentée par le coefficient de sorptivité est égale ou supérieure à celle d'un béton normal compacté par vibration.

### 1.1.5.6.2. Perméabilité à l'eau

La perméabilité est l'aptitude d'un béton de résister à la pénétration de l'eau. Elle dépend principalement de la porosité du béton. Une faible porosité est le signe d'une faible perméabilité est vice versa. Grâce à leur teneur en fines élevée, les BAP sont caractérisés par une faible perméabilité par comparaison aux bétons vibrés pour la même classe de résistance [71]. Kapoor et al. [62] ont rapporté que la profondeur de pénétration d'eau d'un BAP est 5 mm contre 10 mm pour un béton vibré. Du même les études de Zhu et Bartos [74], De Schutter et Audenaert [75], révèlent que la perméabilité des BAP est inférieure à celle des bétons ordinaires. Les comparaisons ont été réalisées à même quantité de ciment et rapport eau/ciment (E/C). La diminution de la perméabilité des BAP est attribuée à l'utilisation des additions minérales.

Selon Hou et al. [76], 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  $0,01\mu\text{m}$ ) sont transformés en pores gélives (diamètre inférieure à  $0,01\mu\text{m}$ ), ceci est dû à la réaction pouzzolanique qui améliore la densification du béton.

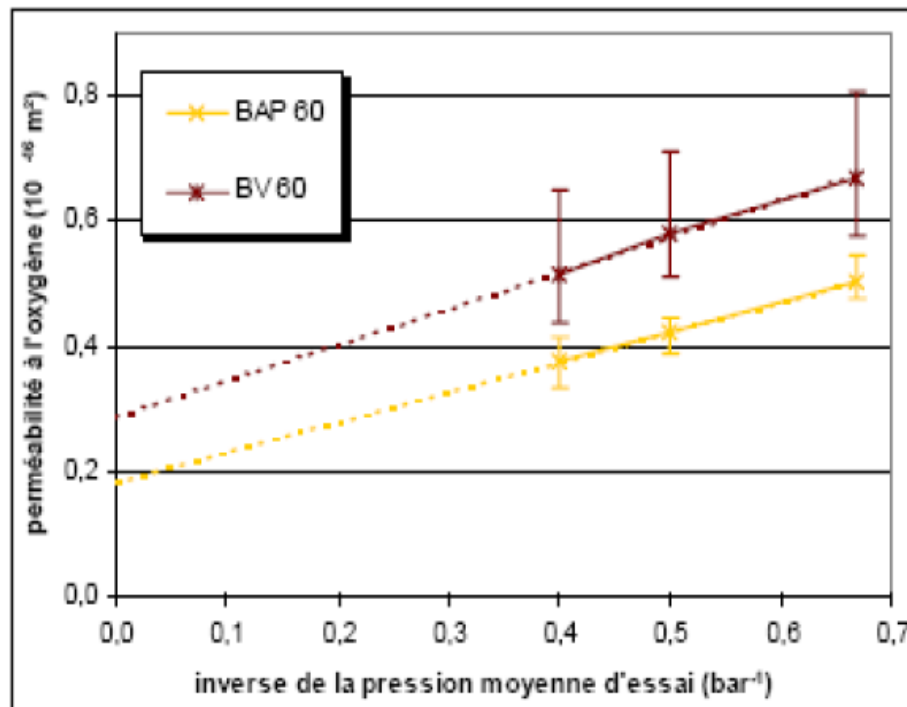


Figure 1.6 : Perméabilité à l'état sec d'un béton autoplaçant et un béton vibrée [26].



Assié [26] dans ses travaux a trouvé que pour trois classes de résistance mécanique (20, 40 et 60 MPa), les bétons autoplaçants possèdent une perméabilité intrinsèque sèche inférieure à celle des bétons vibrés (et ceci pour des porosités accessibles à l'eau comparables). Dans le même contexte, les résultats d'essais de la perméabilité aux gaz ont montré 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 (Fig. 1.6), et c'est la même conclusion de Zhu et Bartos [71].

#### 1.1.5.6.3. Pénétration des chlorures

Les différentes comparaisons publiées sur la diffusion des ions chlore entre les BAP et les bétons ordinaires, ne permettent pas d'en déduire une tendance générale. Certains auteurs [77] ont évalué le comportement des BAP et BV 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. Selon ces auteurs, ces faibles performances pourraient être attribuées à une mauvaise dispersion de l'addition calcaire.

Contrairement, Kapoor et al. [62], Rougeau et al. [78] ont rapporté que, par comparaison aux bétons conventionnels, les BAP présentent une résistance plus grande à la pénétration des chlorures par rapport au BV. Toutefois, pas mal d'auteurs estiment que les résultats indiquant des comportements équivalents des BAP et des bétons vibrés vis-à-vis du mécanisme de diffusion sont les plus courants [26, 79-82].

#### 1.1.5.6.4. Carbonatation

Les premiers résultats faisant état d'une comparaison entre BAP et bétons vibrés indiquent qu'il semble ne pas y avoir de différence notable entre leurs cinétiques de carbonatation [83]. D'autres résultats [84] conduisent à des conclusions similaires. Enfin, toutes compositions confondues, les BAP ont un comportement identique à celui des bétons vibrés. Du même Assié [26] a trouvé lors de l'essai de carbonatation accéléré que les BAP se carbonatent avec une cinétique similaire à celle des BV. Toutefois, d'après Rougeau et al. [78], pour des bétons à hautes performances, la profondeur de carbonatation des BAP est légèrement supérieure à celle des bétons vibrés.

#### 1.1.5.6.5. Résistance aux sulfates

Il n'existe pas beaucoup de travaux qui traitent l'effet de l'attaque sulfatique sur les BAP. Selon Safiuddin et al. [85], les BAP présentent une meilleure résistance aux sulfates. Nagai et al. [86] ont rapporté le même résultat. Un tel résultat est attribué au faible rapport E/P et à la quantité de fines importante qui occupe les vides et minimise la taille des pores de telle sorte que la perméabilité soit faible.

L'incorporation des ajouts minéraux dans les BAP a montré son utilité. Uysal et Sumer [87] ont étudié l'influence des cendres volantes, des laitiers des hauts fourneaux, de la poudre de calcaire, de la poudre de basalte et de la poudre de marbre sur la résistance des BAP aux sulfates. Ces auteurs ont rapporté que la substitution du ciment par des ajouts minéraux mène à une diminution de la perte de résistance. Du à leur activité pouzzolanique, la perte de résistance des BAP contenant des cendres volantes et du laitier des hauts fourneaux est plus faible par rapport aux BAP comportant des fillers.

#### 1.1.5.6.6. Résistance au feu

Le béton n'est pas combustible et ne supporte pas l'étalement des flammes. Il ne produit pas de fumée, de gaz toxiques ni d'émissions quand il est exposé au feu. Le béton a un faible seuil de transfert de chaleur et retient la majorité de sa résistance. D'après le rapport de RILEM en 2008 sur la durabilité des BAP [88], la résistance au feu des bétons autoplaçants est similaire à celle des bétons ordinaires. A cause de la faible perméabilité du BAP, la résistance au feu peut être considérable. Selon Persson [89], l'utilisation des fibres polypropylène a été très bénéfique aux BAP car ils contiennent des pores qui permettent l'emprisonnement des fumées.

#### 1.1.5.6.7. Gel-Dégel des Bétons fluides (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 [90, 91]. Du à leur microstructure interne dense qui réduit la perméabilité, les BAP présentent une meilleure résistance à l'effet gel-dégel [53, 85]. Ceci est bien confirmé par les résultats du Rougeau et al. [78] (Fig. 1.7), et ceux trouvés

par Mortsell et Rodum [79] (Tableau 1.2). Hans-Erik et Pentti [92] et Persson [93], ont aussi confirmé que le BAP a une résistance au gel meilleure que celle d'un béton ordinaire.

Tableau 1.2 : Résultats d'un essai d'écaillage (résistance au gel-dégel) d'un BAP et un béton vibré [79]

Type de béton	N° de cycles					Rapport $M_{56}/M_{28}$
	4	14	28	42	56	
	Ecaillage (kg /m <sup>2</sup> )					
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

Les résultats d'essais de Khayat et Assaad [94] ont montré que les caractéristiques des poches d'air d'un BAP peuvent être similaires à celles d'un béton vibré. Ils ajoutent aussi qu'en général une plus grande stabilité des poches d'air est obtenue quand le mélange du BAP contient une plus grande proportion de pâte de ciment et un plus faible rapport eau/ciment, sauf si un agent de viscosité est incorporé au mélange. De plus, Bassuoni et Nehdi [95] ont trouvé que l'introduction d'un entraîneur d'air dans un BAP est très nécessaire surtout dans un climat froid, pour protéger le mélange exposé à des cycles de gel/dégel.

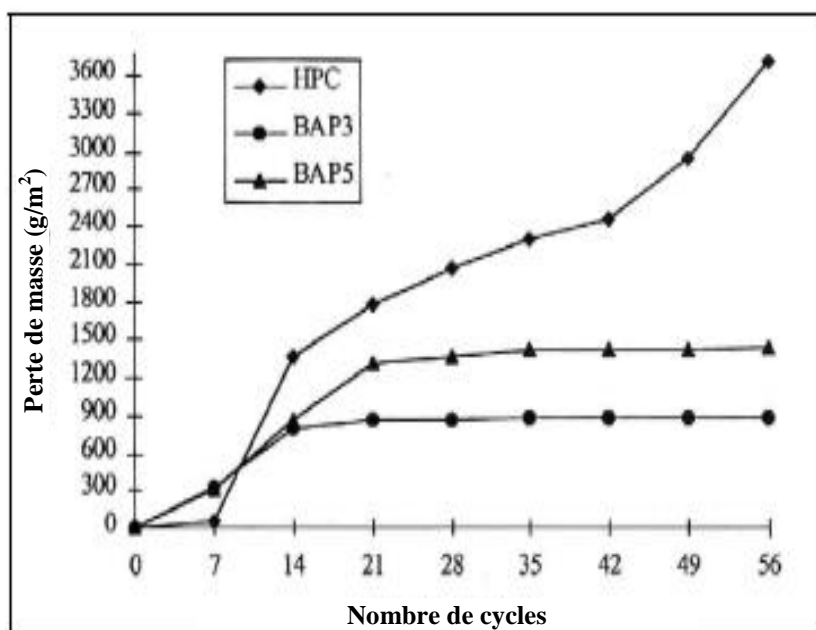


Figure 1.7 : Perte de masse de deux BAP et un béton vibré pendant un test d'écaillage [78].

## 1.2. Effet des additions minérales sur les propriétés des BAP

### 1.2.1. Introduction

Une addition minérale est une poudre d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions : les additions inertes et les additions réactives. Les données bibliographiques recommandent l'emploi de quantités importantes de fines dans un BAP pour assurer sa stabilité à l'état frais et éliminer les risques de ségrégation [7]. Quand ce volume est occupé intégralement par du ciment Portland, il fournit au matériau durci, un niveau de performance excessif par rapport aux spécifications demandées.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue que le dégagement de chaleur engendré par les réactions exothermiques produites lors de l'hydratation du ciment, peut provoquer des fissurations de l'élément et il est donc naturel de remplacer une partie de ce volume par des additions minérales, qui sont moins réactives que le clinker et d'un coût inférieur sur le plan énergétique et environnemental. On passera en revue dans cette partie, les additions minérales qui seront utilisées lors de l'étude expérimentale (fillers calcaires, laitier granulé de hautes fourneaux et pouzzolane naturelle). Ces fines minérales présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons.

#### 1.2.1.1. Avantages économiques et environnementaux

La plupart des additions minérales sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). Ainsi l'incorporation de ces additions dans la formulation de béton comme substituants du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO<sub>2</sub> de l'industrie cimentière dans la nature [6].

### 1.2.1.2. Avantages technique

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 [96]. 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 [97-98].

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 [99], et augmenter la viscosité.

En outre, 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 [100]. 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.

### 1.2.2. Mode d'action des additions minérales

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 cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire.

Il est bien connu de nos jours que la réactivité des additions minérales dépend de leurs minéralogies et des caractéristiques de leurs particules. Généralement, ces additions peuvent être représentées sur le diagramme ternaire illustré sur la figure 1.8.

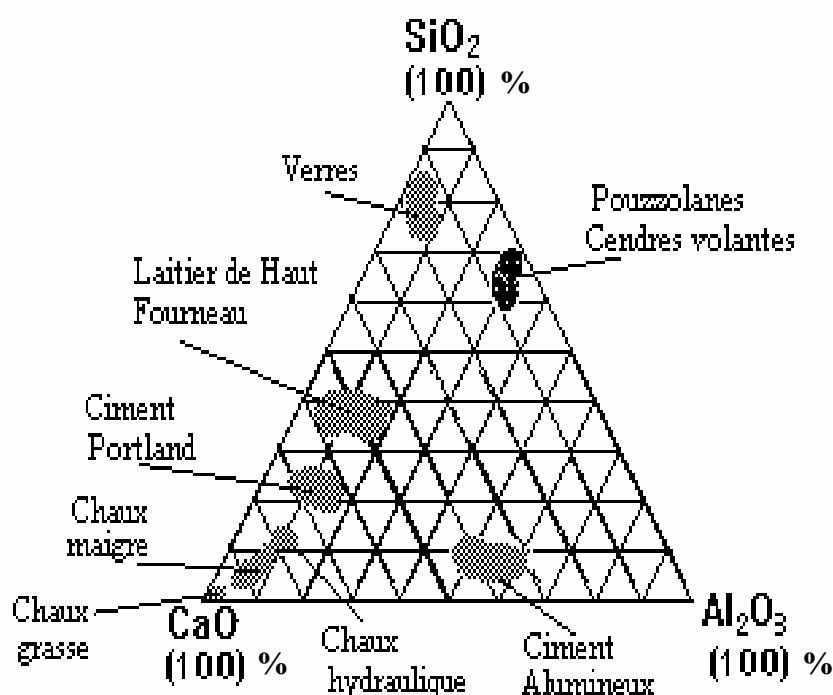


Figure 1.8 : Représentation de principales additions minérales dans un diagramme  $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  [102].

Selon leur activité avec le ciment ordinaire, les ajouts se divisent en ajouts pouzzolaniques et hydrauliquement latents ; qui réagissent et produisent d'autres hydrates, et les fillers inertes qui ont un rôle physique de comblement des interstices et de diminution de la porosité [101]. Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes [69, 98, 103-108], s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire.

#### 1.2.2.1. Effet granulaire

L'effet granulaire appelé aussi effet filler, concerne toutes les modifications induites par la présence des additions minérales dans le squelette granulaire d'un matériau cimentaire à l'état frais. Ces modifications peuvent résulter de la capacité d'empilement des particules fines ou ultrafines de l'addition avec les autres grains solides du mélange et/ou de l'intensité des frictions entre les différentes particules du mélange. Cet effet granulaire peut être favorable ou défavorable en raison de plusieurs facteurs tels que la morphologie, la surface texturale, la distribution granulaire et le potentiel zéta des particules d'addition utilisées ; qui influent sur la rhéologie des matériaux cimentaires [109, 110]. 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.

La finesse des particules d'addition peut être aussi un facteur qui influence la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais. En effet, Collins et Sanjayan [111], ont rapporté que dans les bétons, la fluidité du mélange était améliorée en remplaçant une partie du ciment par des additions ultrafines. Bessa [69] également a pu montrer que l'effet granulaire des additions minérales sur les formulations des mortiers non adjuvantés dépend en premier lieu de la finesse et de la quantité de l'addition introduite.

#### 1.2.2.2. Effet physico-chimique et microstructural

L'effet physico-chimique et microstructural concerne toutes les modifications engendrées par les multiples interactions entre les particules de l'addition minérale sur le processus d'hydratation du ciment et sur la structuration des produits hydratés. 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 [112-115].

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 [113-114]. 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 d'une matrice cimentaire plus efficace [106].

A nos jours, il n'est donc plus à démontrer que les additions minérales jouent un rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions de ciment, permettant une meilleure répartition des produits hydratés et conduisant ainsi à une structuration plus efficace de la matrice cimentaire [63, 105, 106, 115]. Pour les additions calcaires, il semble que la présence du carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ) favoriserait l'hydratation du  $C_3S$  dès les premiers instants d'autant plus que les particules sont fines et la quantité de  $CaCO_3$  est importante (jusqu'à 15 à 20 % en masse) [116]. Pour les additions siliceuses, les particules de quartz peuvent constituer des sites préférentiels de nucléation en particulier pour la cristallisation des cristaux de portlandite [117].

D'après Caré et al. [116], plus les particules d'additions minérales sont fines, plus elles favorisent les propriétés du matériau durci aux jeunes âges, en accélérant les réactions d'hydratation du ciment. Mais cet effet positif, semble s'estomper avec le temps. En effet, Husson [118] a montré en étudiant l'analyse physico-chimique et mécanique des interactions ciment – fillers dans les mortiers, qu'à long terme, les additions minérales utilisées dans certaines proportions pouvaient avoir un effet retardateur plus important que l'effet accélérateur aux jeunes âges.

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 aux jeunes âges ainsi que sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis.



### 1.2.2.3. Effet chimique

Un effet purement chimique propre à certaines additions en milieu cimentaire (essentiellement présent dans le cas des additions du type II selon la norme NF EN 206 [119]), qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit fortement avec l'effet physicochimique et microstructural.

Alors que l'effet physico-chimique et microstructural concerne d'une façon générale toutes les additions minérales indépendamment de leur nature minéralogique, l'effet chimique est intimement 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 NF EN 206 [119] 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, les schistes calcinés et le laitier granulé. La silice amorphe présente dans ces différentes additions réagit en présence de l'eau avec la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formée durant l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés C-S-H suivant la réaction suivante (Eq. 1.3) :



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 [29]. Dans ce cas, la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) réagit avec les aluminates du ciment ( $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{13}$ ) en présence de l'eau pour former un mono-carboaluminate de calcium hydraté du type  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ , 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 [69].

### 1.2.3. Effet des additions minérales sur les caractéristiques des BAP

Les additions minérales substituant le ciment peuvent être classées 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.

### 1.2.4. Fillers calcaire

Les additions calcaires sont majoritairement utilisées dans le cadre de la formulation des bétons autoplaçant, un grand volume d'addition est nécessaire de manière à réduire la quantité de ciment induite par l'augmentation du volume de pâte nécessaire pour permettre l'écoulement du béton [120].

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 [121], 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 (Fig.

1.9) 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 [120].

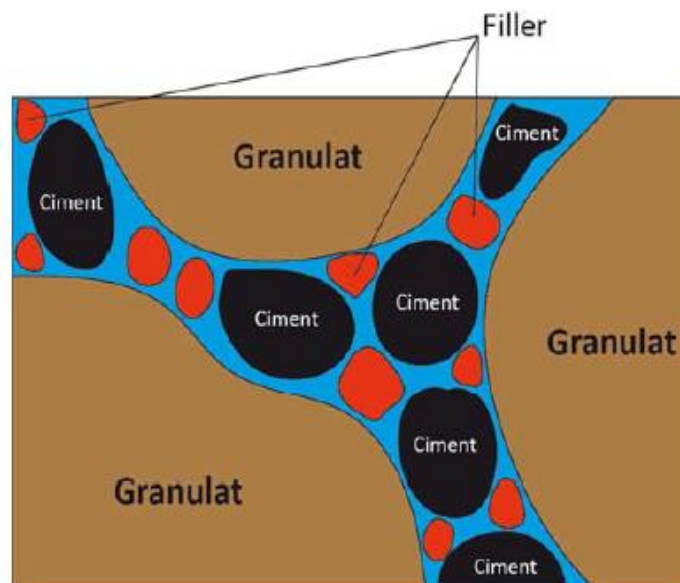


Figure 1.9 : Illustration de l'effet filler [120].

#### 1.2.4.1. Effet de fillers calcaire sur le comportement des BAP à l'état frais

Largement employé dans les nouveaux bétons, tels que les BAP et à des dosages élevés, le filler calcaire se caractérise par de faibles besoins en eau par rapport au ciment. L'utilisation de ce filler permet par définition de combler les vides entre les grains de dimensions plus importantes du ciment, ce qui conduit à la réduction de la demande en eau de la pâte de ciment ainsi obtenue [122]. Cet effet bénéfique est expliqué par Schmidt [123] : « 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 [124].

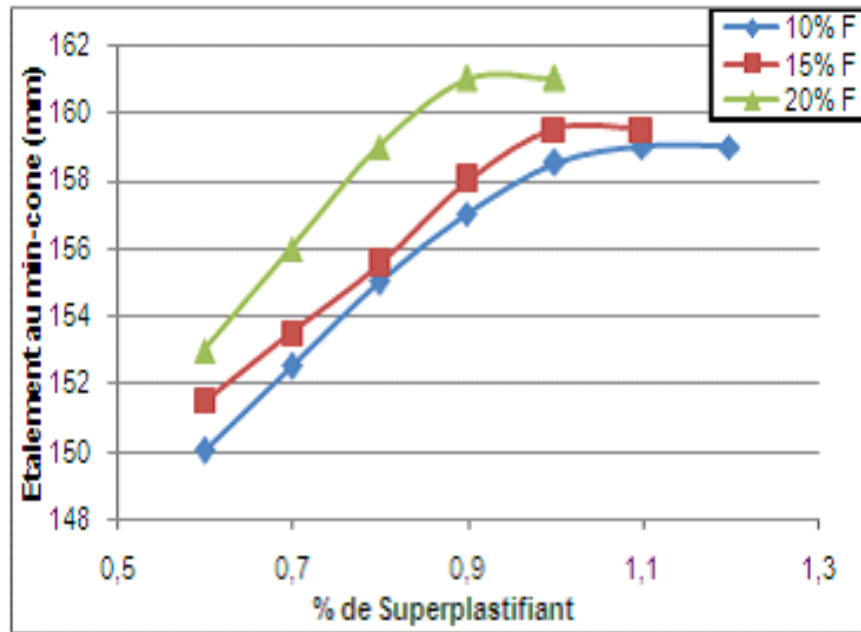


Figure 1.10 : Evolution du diamètre d'étalement au mini-cône en fonction du dosage en superplastifiant et pourcentage d'ajout en fillers calcaires [128].

En effet, plusieurs travaux [96, 125] révèlent que l'ajout du filler calcaire pour un dosage constant en ciment, diminue la viscosité de la pâte de ciment et cela malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides. Cependant, au-delà d'une certaine valeur critique en filler calcaire, on assiste à une augmentation de la viscosité qui entraîne une augmentation du seuil de cisaillement si la concentration volumique en solides de la suspension augmente [99, 120].

Zhu et Gibbs [126] ont étudié l'influence de différents types de fillers calcaire dans le béton autoplaçant. Quel que soit le type de filler utilisé, leurs résultats montrent que plus il y a de filler en remplacement du ciment, moins il faut de superplastifiant pour atteindre un étalement donné. Du même, Derabla et Larbi [127] ont trouvé que l'utilisation de filler calcaire (LF) permet d'augmenter la fluidité du BAP mais elle affecte négativement sa stabilité ( $S > 10\%$ ) en diminuant la viscosité plastique du mélange. Bellifa et al. [128] ont montré aussi que la substitution partielle (10 ; 15 et 20%) du ciment par des fillers calcaires a permis d'améliorer la fluidité des pâtes autoplaçantes (Fig. 1.10). Ceci est dû aux faibles réactions chimiques des fillers calcaires avec les composants du ciment ou l'eau de gâchage.

#### 1.2.4.2. Effet de fillers calcaire sur les propriétés mécaniques des BAP à l'état durci

##### 1.2.4.2.1. Résistance à la compression

Plusieurs études [26, 129, 130] ont comparé l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires à celle des bétons vibrés. Ces auteurs ont observé une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours. Zhu et Gibbs [126] ont étudié l'effet de trois poudres de calcaire de différentes finesses sur la résistance à la compression du BAP. Ces auteurs ont observé pour le même rapport E/C des augmentations de la résistance à la compression de 60 à 80% à 7 jours, de 30 à 40% à 28 et à 90 jours par rapport aux bétons conventionnels. Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de 10% [41, 131-133]. Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution [101, 134]. D'après Schmidt [123] et Saadi [132], cette diminution est attribuée à l'effet de dilution du filler calcaire.

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 pâte-granulats [135].
- Influence sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation [129] mais également en modifiant les produits d'hydratation formés [136, 137].

Pour Petersson [138] et Mehta [101], cette résistance augmente d'autant plus que la finesse du filler est importante. De même Bouali [134] confirme que la résistance à la compression du ciment contenant du calcaire augmente avec l'augmentation de la finesse jusqu'à 5890 cm<sup>2</sup>/g, mais reste toujours inférieure à celle du ciment de référence. Néanmoins avec des proportions de 5 et 15%, la résistance à la compression au jeune âge est meilleure que celle du ciment témoin. La contribution aux gains de résistances apportés par le filler calcaire est due principalement à la réduction de la demande en eau et une meilleure utilisation du potentiel hydraulique du clinker. 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 [139].

En outre, d'autres chercheurs ont montré l'effet négatif des fillers calcaires sur la résistance à la compression du BAP [44]. Bellifa et al. [128] ont remarqué aussi, que la substitution d'une partie du ciment portland par les fillers calcaires est à l'origine d'une diminution croissante des résistances à la compression (Fig. 1.11). Toutefois, quel que soit le pourcentage d'ajout, la résistance à la compression augmente dans les trois pâtes au cours du temps traduisant le développement des hydrates. Du même Boukni et al. [140] ont étudié l'évolution des propriétés mécaniques des BAP avec trois différents dosages en fillers calcaires F/L (BAP3 : 0.42 ; BAP4 : 0.25 et BAP5 : 0.10). A travers cette étude, les auteurs ont montré que l'augmentation du dosage en fillers fait diminuer les résistances à la compression pour toutes les échéances.

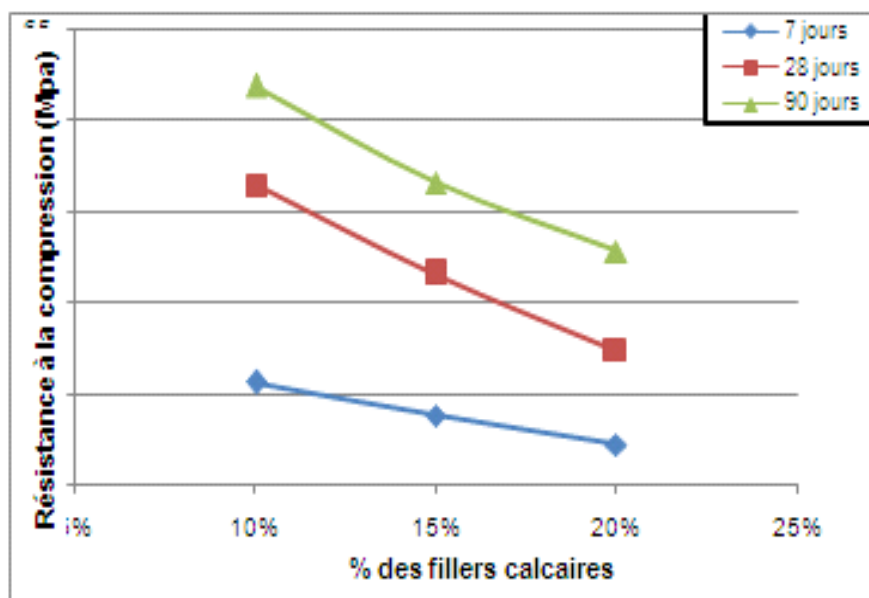


Figure 1.11 : Evolution des résistances à la compression des pâtes autoplaçantes en fonction du pourcentage de calcaire [128].

#### 1.2.4.2.2. Résistance à la traction

Para et al. [42] ont trouvé que la résistance à la traction des BAP à base de fillers calcaires, est inférieure de l'ordre de 15 % à celle d'un béton vibré. En plus, cette résistance ne suit pas le même chemin dans les deux types du béton, à 7 jours la différence entre les deux est faible, dans une moyenne de 3%, et à tendance de disparaître lorsque le dosage des fines de calcaire dans les BAP est élevé. A long terme (28 et 90 jours d'âge), la différence est

de l'ordre de 15%. Du même, Boukni et al. [140] ont montré dans leurs travaux que, comme les résistances en compression, les résistances en traction par flexion diminuent quand on remplace une quantité de ciment par les fillers calcaires pour toutes les échéances.

#### 1.2.4.2.3. Module d'élasticité

L'effet des ajouts minéraux sur le module d'élasticité des BAP a été étudié par plusieurs chercheurs. Les résultats trouvés montrent que la substitution du ciment par des ajouts minéraux de différentes natures (inerte et pouzzolanique) conduit vers la diminution des modules d'élasticité. Boukni et al. [140] ont montré que, l'accroissement du dosage de fillers calcaires influe négativement l'évolution du module d'élasticité du béton autoplaçant. L'auteur a trouvé aussi que le règlement BAEL fournit des modules d'élasticité proches de ceux évalués expérimentalement dans son étude.

Parra et al. [42] ont trouvé aussi, que le module d'élasticité des BAP contenant des fillers calcaire, est inférieur de 2% par rapport au BO, en raison de la plus grande quantité de pâte de ciment dans les bétons autoplaçants. Du point de vue déformabilité, l'auteur a démontré que le comportement des BAP est très similaire à ce du BO, et par conséquent, les expressions fournies par les différents codes et normes pour estimer le module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression peuvent être considérées comme valables pour le cas des BAP.

#### 1.2.4.2.4. Retrait et gonflement

D'après Boukni et al. [140] et Van et Montgomery [141], les fillers calcaires peuvent avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'ils sont utilisés avec une finesse et une proportion adéquates.

Bouali [134] a montré aussi, qu'un mortier contenant 15% de calcaire possède, à 2 ; 7 et 28 jours, un retrait de 25 ; 16 et 7% inférieur à celui d'un mortier sans calcaire. Ce mortier a des propriétés mécaniques et perméabilité à l'eau similaires à celles du mortier témoin. En utilisant des ajouts inertes tels que le sable de dune, Arroudj et Oudjit [142] ont constaté que la substitution du ciment par 10% de sable de dune finement broyé engendre une diminution considérable du retrait comme l'illustre la figure 1.12.

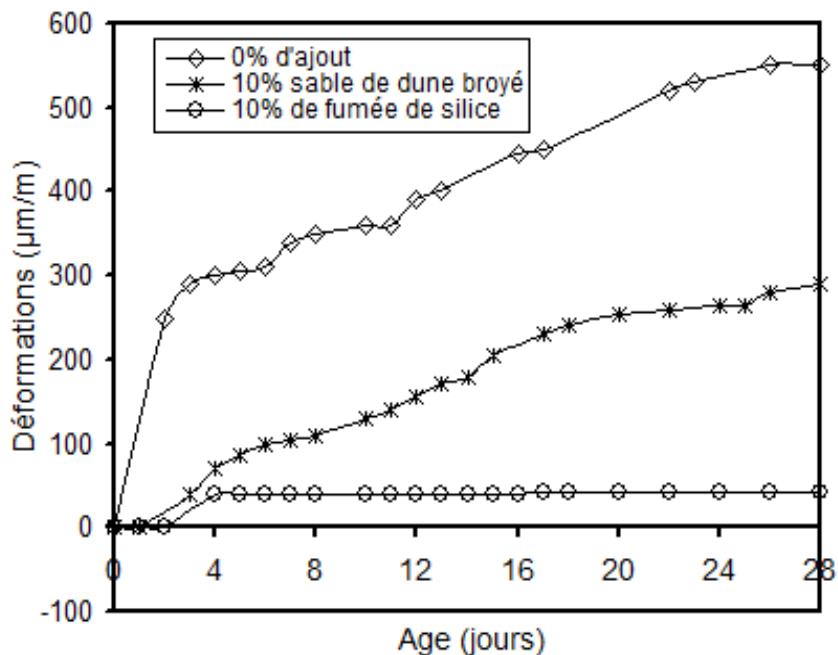


Figure 1.12 : Influence de la nature de l'ajout sur le retrait des bétons pour E/C de 0,3 [142].

#### 1.2.4.3. Effet de fillers calcaire sur la durabilité des BAP

La durabilité des bétons peut être reliée en grande partie à la pénétration d'agents nocifs ( $\text{CO}_2$ , chlorure...). Une étude de l'incidence du calcaire finement broyé sur la durabilité des bétons conservés dans l'eau de mer [143] 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 par conséquent une augmentation des résistances chimiques dans les milieux agressifs (l'eau de mer) [143].

##### 1.2.4.3.1. Porosité

D'après Buil et Ollivier [144], le filler calcaire ( $\text{SSB} = 7581 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) est une addition inerte ne pouvant avoir qu'un effet de remplissage et de germination hétérogène qui est notable sur la porosité uniquement à court terme. En effet, les distributions et la taille des pores de ciment CEM I et CEM II à base de filler calcaire, pour la même classe de résistance sont très voisines.



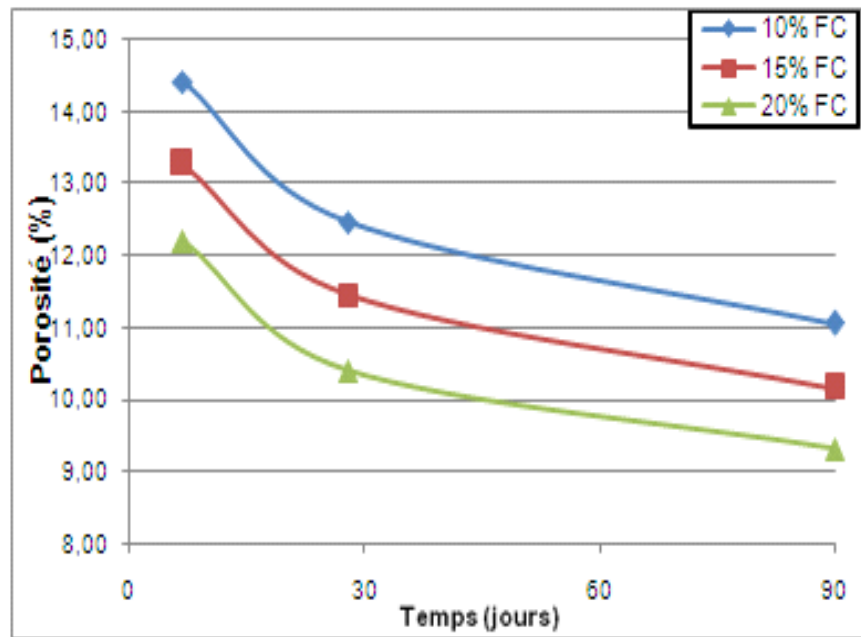


Figure 1.13 : Evolution de la porosité des pâtes autoplaçantes en fonction du pourcentage de calcaire [128].

En outre, Bellifa et al. [128] ont montré que la substitution du ciment par les fillers calcaires semble entraîner une réduction de la porosité capillaire des pâtes autoplaçantes (Fig. 1.13). Les auteurs ont remarqué aussi que l'ajout des fillers calcaire a diminué la taille des pores capillaires inférieurs à 5  $\mu\text{m}$ . Cet effet positif du fillers calcaire sur la porosité des BAP, est fonction du dosage de ces derniers. En effet, l'étude de Diederichi [120] a montré que les BAP avec 35 % de fillers calcaires présentent une porosité plus élevée que celles avec 25% de fillers pour une même résistance mécanique.

#### 1.2.4.3.2. Perméabilité et sorptivité

L'étude de la perméabilité des bétons contenant des fillers calcaires est 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, ainsi que la sportivité à l'eau, les résultats semblent contradictoires et varient suivant les études réalisées. En effet, Tsivilis et al. [145, 146] et Boel et al. [147] ont conclu que l'ajout de filler calcaire n'influe pas sur ces deux caractéristiques, alors que Zhu et Bartos [71] ont trouvé des valeurs légèrement inférieures pour les bétons avec fillers calcaire.

Pour un même rapport E/L et même classe de résistance des bétons, Siad et al. [148] ont montré que la perméabilité des bétons ordinaires est de l'ordre de 2 à 3 fois plus importante que celle des BAP à base de fillers calcaires. Ce résultat a été confirmé par d'autres auteurs, tel que Zhu et al. [74] et Assie et al. [149] qui rapportent, que les bétons à base de filler calcaire présentent des perméabilités égales ou inférieures aux bétons sans filler.

Les résultats obtenus par Assié [26] sur l'absorption capillaire entre des bétons à base de ciment Portland ordinaire et des BAP à base de filler calcaire à différentes classes de résistance ne permettent pas de se prononcer sur la cinétique d'absorption entre les deux types de bétons. Néanmoins, l'auteur admet qu'il y a une certaine ressemblance entre l'absorption capillaire des BAP et celle des bétons ordinaires. En outre, Böel et al. [147] rapportent que l'influence du filler calcaire est bénéfique pour l'absorption. Ceci a été confirmé aussi par Zhu et al. [74], qui ont démontré que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons ordinaires et qu'elle est d'autant plus faible avec l'augmentation des fillers calcaires.

#### 1.2.4.3.3. Pénétration des chlorures

D'après Zhu et al. [74], la résistance à la pénétration des ions chlore est très influencée par le type d'addition minérale employée dans le béton. Les BAP formulés sans filler calcaire, présentent des coefficients de migration des ions chlore similaires, avec une valeur légèrement plus faible pour celui formulé avec un filler calcaire. Ces auteurs indiquent également que l'emploi des cendres volantes diminue considérablement le coefficient de migration de ces bétons.

Contrairement, Tang et al. [77] ont réalisé une comparaison entre un BAP à base de filler calcaire en substitution d'une partie du ciment et un béton ordinaire sans addition. Les deux bétons ont subis un essai de diffusion des ions chlorure sous un champ électrique. Les résultats révèlent que le coefficient de diffusion du BAP est de 2 à 3 fois supérieure à celui du béton ordinaire et cela malgré un rapport eau/ciment (E/C) plus faible pour le BAP, qui est de 0,4 contre 0,5 pour le béton ordinaire. Ces coefficients de diffusion élevés s'expliquent par une mauvaise dispersion des particules de l'addition.

#### 1.2.4.3.4. Carbonatation

Assié [26] a effectué une série d'essais sur des bétons à base de ciment Portland et des BAP à base de filler calcaire et à différentes classes de résistance mécanique (15 à 70 MPa). Il a constaté que les BAP se carbonatent légèrement plus vite que les bétons ordinaires et ceci pour chaque classe de résistance. L'auteur a expliqué la différence des comportements par une porosité ouverte (accessible à l'eau) généralement plus élevée pour les BAP. Ces résultats ont été confirmés par d'autres auteurs [150, 70]. De Schutter et al. [70] ont étudié aussi l'influence du dosage en ciment et de l'ajout de filler calcaire sur la carbonatation des BAP. Ils ont démontré que l'augmentation de la quantité de ciment améliore la résistance à la carbonatation et que l'addition de filler n'influence pas la profondeur de carbonatation.

#### 1.2.5. Laitier granulé 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 NF EN 15167-1 [151], 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.

##### 1.2.5.1. Effet du laitier sur le comportement des BAP à l'état frais

Il est prouvé par plusieurs études, que l'ouvrabilité des bétons au laitier est bien améliorée comparée à celle des bétons sans laitier [5, 87, 152-157]. Selon Boukendakdji [5], le rapport E/C diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier. Fulton [153] a indiqué qu'avec l'ouvrabilité constante, la réduction de la teneur en eau est de l'ordre de 5 % avec probablement une augmentation de la résistance. Kateb [154] a étudié également l'effet de l'incorporation du laitier dans un BAP à raison d'un taux de substitution de 25% du poids de ciment, l'auteur a montré une amélioration de l'écoulement et la résistance à la ségrégation des BAP avec du laitier.

Du même Sheen et al. [158], ont trouvé une bonne fluidité et viscosité des BAP contenant moins de 20% du laitier. A ouvrabilité constante, Gesoglu et al. [156], ont observé que l'augmentation du taux de laitier granulé, a entraîné une diminution dans la demande en superplastifiant d'un BAP, avec l'amélioration de la capacité au passage et la viscosité de ce dernier.

D'après les travaux de Kadri et Duval [155], et d'autres recherches [96, 99, 100], cette amélioration est souvent attribuée à la forme sphérique, la distribution des particules de petite dimension, la qualité de la surface vitreuse et lisse, et au faible taux d'absorption des grains du laitier, qui crée des points de glissement dans la pâte et le mortier et par conséquent une faible demande en eau et une meilleure cohésion. En effet, Toutou [159], ont rapporté que l'écoulement du laitier dépend de deux composantes : une composante physico-chimique liée au potentiel d'interaction entre les particules et de l'interaction des fines avec le liquide saturant, et une composante granulaire liée aux frottements des particules.

Des études [10, 160, 161] ont montré que l'ajout du laitier granulé de hauts fourneaux en substitution du ciment, permet globalement de baisser le seuil de cisaillement et la viscosité et d'augmenter la plasticité des pâtes de ciment. Ce qui le rend bénéfique pour la formulation des bétons autoplaçant. En effet, plusieurs études [5, 162] ont montré que 15% du laitier est optimal du point de vue ouvrabilité, écoulement, capacité au remplissage et au passage et résistance à la ségrégation. D'après EUGC [163] 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 du laitier dans le béton conduit à un retard de prise, habituellement de l'ordre de 30 à 60 minutes [164]. Brooks et al. [165] ont trouvé que l'inclusion des ajouts minéraux et spécialement le laitier à 40% retarde le temps de prise. Paine et al. [166] 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.

### 1.2.5.2. Effet du laitier sur le comportement des BAP à l'état durci

#### 1.2.5.2.1. Résistance à la compression

La cinétique d'hydratation des laitiers est plus lente que celle du ciment Portland ; par conséquent le développement de la résistance sera inférieur, et l'addition du laitier diminuera la résistance mécanique du béton à jeune âge, qui se rattrapera à plus longues échéances, principalement par l'effet hydraulique et pouzzolanique significatifs au-delà de 28 jours [76, 152, 167-171]. En effet, Behim et al. [172] ont mené une étude sur des mortiers contenant de 0 à 90% de laitier d'El-Hadjar ayant une surface spécifique allant de 2500 à 4000 cm<sup>2</sup>/g. Les résultats trouvés montrent que le durcissement des ciments au laitier est plus lent que celui des ciments ordinaires dans une période initiale de 2 à 7 jours, par contre ces dernières développent des résistances mécaniques comparables et parfois supérieures à celles du ciment Portland à moyen et à long termes. En outre Borsoi et al. [173] ont trouvé une amélioration dans la résistance à la compression des mélanges contenant du laitier uniquement même dans le premier âge.

Le laitier d'El-Hadjar est inactif dans l'eau avec une dissolution des ions presque nulle même pour des finesses allant jusqu'à 6000 cm<sup>2</sup>/g. Par contre, il est très actif en présence d'un activateur [172] telle que sa conductivité est dix fois plus importante lors d'un mélange contenant 76% de laitier et 24% de CPA. De même la pâte pure de laitier ne manifeste aucune prise même après 48 heures d'observation [174]. Ce laitier est considéré comme étant moyennement réactif avec une faible hydraulicité qui ne permet pas d'introduire des pourcentages élevés dans le béton comme en Angleterre et en France où on introduit jusqu'à 70 et 80 % [156, 175], pour le laitier d'El-Hadjar seuls 30% peuvent être ajoutés.

Amrane et Kenai [176] 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, ils ont enregistré une résistance nettement supérieure à celle du béton de référence, ce qui est confirmé par Boukendakdji [5], Kriker [174], Wang et Lin [177], Behim et al. [178] et Rouis [179]. Par contre Hammat [180] a remarqué que les résistances des mortiers autoplaçants contenant 15% et 30% de laitier sont comparables à celles du mortier de référence. D'après Uysal et al. [157], en remplaçant 20% du ciment Portland (PC) par du laitier, la résistance du BAP à 28 jours peut atteindre 78 MPa.

#### 1.2.5.2.2. Résistance à la traction

Tout comme les résistances à la compression, Boukendakdji [5] a trouvé que les résistances à la traction des BAP, 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%.

Selon Guneyisi et Gesoglu [53] 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 de 50 et 60% en laitier dans le cas de 90 jours de cure dans l'eau.

#### 1.2.5.2.3. Module d'élasticité

Le béton au laitier montrera un module d'élasticité similaire ou légèrement supérieur que celui du béton avec du CPA quand le béton est conçu pour la même résistance de compression. A la température de 20° C, le module d'élasticité des deux bétons montre une tendance similaire ou une faible différence avec des proportions de laitier entre 30% et 70% [152]. Les travaux menés par Banforth [181] avec une proportion de laitier de 75% ont montré que pour une résistance de compression donnée, les bétons aux laitiers possèdent un module d'élasticité supérieur à celui du béton ordinaire.

Selon beaucoup de chercheurs [153, 181], la différence dans le module élastique a changé entre 0 à 6 GPa. D'après Fulton [153], la substitution de 50% du CPA par le laitier par Stutterheim [182] et 50 et 70% par Tattersall et Banfill [183], peu de différence a été observé sur le module d'élasticité. Pour des résistances à la compression inférieures ou égales à 30 MPa, Wainwright et Tolloczko [184] et ont trouvé aussi un module d'élasticité inférieur à celui du béton sans laitier.

#### 1.2.5.2.4. Retrait et gonflement

Il y a peu d'études de l'effet du laitier sur les variations dimensionnelles du béton. Kateb [154] a trouvé une diminution de 10 et 15% dans le retrait et gonflement respectivement, des BAP à base de laitier par rapport au BAP de référence (sans laitier). Du même Guneyisi et al. [185], ont montré que plus en augmentant le taux du laitier dans le BAP,

plus le retrait diminue. Contrairement aux Wang et Lin [177] qui ont montré une augmentation dans les valeurs du retrait des BAP, avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par le laitier.

#### 1.2.5.3. Effet du laitier sur la durabilité des BAP

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-S-H, et la microstructure résultante de la pâte de ciment hydraté est dense [164]. Et par conséquent, l'attaque des agressions chimiques est réduite. D'autre part, les ciments contenant 40% ou plus de laitier ont généralement une bonne résistance aux sulfates et en particulier si la teneur en C<sub>3</sub>A est faible [87, 186]. En outre, Sheen et al. [158], ont trouvé les meilleures résistances aux sulfates dans le cas des BAP à base de 10% de laitier.

Nehdi et al. [187] ont confirmé que l'introduction des additions minérales en grande quantité, pour des mélanges binaires, ternaires et même quaternaires, améliore la durabilité des BAP et donne des grandes résistances à long terme, bonne résistance au gel dégel, faible expansion au sulfate et une très faible perméabilité aux ions chlore.

##### 1.2.5.3.1. Porosité

Du fait de leur réaction hydraulique latente, le laitier granulé donne des pâtes avec une porosité plus importante et l'interconnectivité des pores augmente aux jeunes âges. Par contre sur le long terme et sous une cure humide adéquate, l'effet chimique peut permettre une évolution notable de la porosité et la porosité capillaire finale peut être du même ordre de grandeur avec une diminution de la taille des grands pores en augmentant la substitution du ciment par du laitier [90]. D'après Boucetta [167], la réduction de la porosité du béton est d'autant plus importante que l'addition est réactive.

Feldman [188] a étudié l'influence de l'ajout de 70 % du laitier dans le cas de pâte de ciment ( $E/L = 0,45$ ) sur la porosité dans le temps. Cette étude montre que la présence du laitier augmente les pores de plus grande dimension à jeune âge et les raffine à long terme. Du même, et pour une ouvrabilité constante, Al-Otaibi [189] a trouvé une diminution de la porosité des bétons contenant 60% de laitier. En outre, Derabla et Larbi [127] ont trouvé que l'incorporation de 20% du laitier granulé donne un BAP moins poreux que ceux sans addition.

#### 1.2.5.3.2. Perméabilité et sorptivité

L'absorptivité est étroitement liée au développement de la microstructure de la phase liante du matériau cimentaire et régie par les pores capillaires (diamètre, répartition et quantité). Par conséquent, elle est influencée par la nature de l'addition. D'après Behim et al. [178], les BAP à base de laitier, présentent une sorptivité relativement moins importante par rapport aux bétons à base de filler calcaire. L'incorporation du laitier granulé permet de réduire à la fois le volume et les dimensions des capillaires par la formation de nouveaux C-S-H résultants de l'activité hydraulique et pouzzolanique de l'addition. Du même, Guneyisi et Gesoglu [53] ont montré que, les caractéristiques de l'absorption d'eau du béton diminuent avec l'augmentation du dosage en laitier indépendamment des conditions de cure et de l'âge.

Beaucoup de chercheurs [170, 190-191] ont rapporté que l'incorporation des laitiers, provoque une augmentation du nombre de petits pores de gel, et transforme les pores capillaires (diamètre supérieure à 100 Å) en pores gélives (diamètre inférieure à 100 Å) qui à leur tour donne une pâte de ciment de très faible perméabilité. Ceci est dû à la réaction pouzzolanique qui améliore la densification du béton.

Mansoor [192], a étudié l'effet de substitution entre 40 et 80% du ciment par le laitier granulé sur la perméabilité d'un béton à 28 jours et 270 jours, avec E/C de 0,3 et 0,4. Il a conclu qu'au-dessous de 40%, le laitier de haut fourneau a montré peu d'effet sur la perméabilité, et entre 40 et 80 % le coefficient de perméabilité diminue progressivement, mais pour plus de 80 %, la perméabilité augmente. En outre, Shi et al. [193] ont rapporté que, la substitution de 30% du ciment Portland par du laitier granulé réduit le coefficient de perméabilité des gaz, au-delà de ce taux, la perméabilité au gaz augmente légèrement.

En ce qui concerne les BAP, Uysal et Yilmaz [44] ont rapporté que les BAP contenant 20% de laitier de hauts fourneaux, présentent une grande résistance à la pénétration d'eau par rapport aux ceux à base des cendres volantes ou de la poudre de calcaire. Du même, Kateb [154] a trouvé que la perméabilité des BAP à base de laitier granulé, est inférieure par rapport au BAP de référence, avec une différence de 42 et 78 % à 28 et 90 jours respectivement. Il a aussi observé, que la profondeur de pénétration d'eau dans les BAP à base de laitier est trop faible par rapport au BAP de référence. Dans l'étude de l'effet du laitier granulé sur les performances d'un BAP à base de granulats recyclés, Kouider Djelloul et al. [194], ont observé une diminution dans l'absorption capillaire et la profondeur de pénétration d'eau des BAP contenant 15% du laitier granulé.



#### 1.2.5.3.3. Pénétration des chlorures

Anastasiou et al. [169], ont montré l'effet positif du laitier granulé sur le développement de la résistance à la compression à 28 et 120 jours. Les mesures de la résistance au gel-dégel et, en particulier, de la résistance à la pénétration du chlorure ont montré qu'en augmentant la teneur en laitier, la durabilité du BAP augmente. Du même, Uysal et al. [157] ont trouvé la meilleure résistance à la pénétration des ions chlorure dans les BAP contenant 60% du laitier.

D'après les travaux de Andra cités par Boucetta [167], le laitier diminuerait plus la diffusion que les cendres volantes, mais cette hypothèse est liée au rapport eau/liant (E/L), aux conditions de cure et au mode d'incorporation de l'addition (substitution ou addition). Une combinaison entre plusieurs additions minérales, notamment, entre une addition inerte et une addition réactive s'avère plus efficace afin de diminuer la diffusivité.

#### 1.2.5.3.4. Carbonatation

Selon les travaux de Sisomphon et Franke [195], un béton à base d'un liant contenant du laitier granulé, présente une carbonatation d'environ 65 % plus qu'un béton au ciment Portland en conditions naturelles et accélérées. Du même l'étude de Bouikni et al. [196], ont montré que pour une substitution de 65 % du ciment Portland par du laitier, le béton se carbonate 15 à 30% plus qu'un béton à 50% de substitution et cela en conditions naturelles.

#### 1.2.6. 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 [197]. 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 [197]. Plusieurs pays comme la Chine, la Grèce, l'Italie, l'Inde et le Mexique, utilisent encore des millions de tonnes de pouzzolane naturelle pour fabriquer des ciments pour des raisons d'économie d'énergie où il n'est pas nécessaire de la pulvériser ou de la soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de cette matière 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. 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 fois 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.

#### 1.2.6.1. Effet de la pouzzolane naturelle sur le comportement des BAP à l'état 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. [198]. Il a été montré que la substitution du ciment par 10 à 30% de la pouzzolane, 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.

En étudiant l'effet du calcaire, laitier et pouzzolane sur les caractéristiques d'un béton, dont le volume absolu des phases solides et l'ouvrabilité sont conservés constants, Boudchicha [199] a montré que le besoin en eau des mortiers est d'autant plus important que le taux de substitution du ciment par les additions est grand, et que le mortier avec la pouzzolane présente le plus fort besoin en eau que du mortier sans addition. Colak [200], Mouli et Khelafi [201] ont montré également qu'à maniabilité constante, le besoin en eau des pâtes de ciment Portland augmente lorsque le ciment est substitué par la pouzzolane naturelle.

Hammat [180] et Allali [202] ont confirmé cette réduction d'ouvrabilité traduite par une réduction du diamètre de la galette du BAP décrit par l'essai d'étalement. Diamantonis et al. [203], ont aussi observé que la substitution du ciment portland par 20 à 40% de pouzzolane naturelle, augmente la valeur du seuil d'écoulement des BAP d'une manière significative.

D'après Turanli et al. [204], cette augmentation de la demande en eau est interprétée par la nature microporeuse, la forme angulaire et surfaces rugueuses des particules de la pouzzolane naturelle, qui donne une capacité d'absorption d'eau plus importante dans les pâtes de ciment. Selon Allali [202], la valeur du temps d'écoulement à l'entonnoire en V ( $t_{V, \text{Funnel}}$ ) augmente légèrement avec l'augmentation du dosage de la PZN pour le cas de finesse de 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ . 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 de la ségrégation statique.

Dans l'étude de l'effet de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf sur le comportement à l'état frais des BAP à base de granulats recyclés (50 et 100%), Kenai et al. [205] ont montré que la substitution de 15% de ciment par la pouzzolane naturelle entraîne une diminution de l'ouvrabilité des BAP, mais ces derniers se caractérisent par une bonne homogénéité.

#### 1.2.6.2. Effet de la pouzzolane naturelle sur les propriétés mécaniques des BAP à l'état durci

##### 1.2.6.2.1. Résistance à la compression

La lenteur de la réactivité de la pouzzolane engendre un retard de sa prise. Les temps de début et de fin de prise augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la quantité substituée au ciment. Cela s'explique par la réaction pouzzolanique retardée et par la faible quantité de CSH formée au très jeune âge. Ce retard devient plus important, notamment pour 40 et 50 % de taux de substitution. Pour un taux de 20% en pouzzolane, les temps de début et de fin de prise se sont prolongés respectivement de 35 et 77 minutes [206]. De même, le début de prise a diminué d'une heure en allant d'une finesse de 3500 à 5700  $\text{g}/\text{cm}^2$  de la pouzzolane [207].

Par conséquent et d'après plusieurs auteurs, la plus grande partie de l'évolution des résistances se produit après 28 jours [132, 206-209]. Belaribi et al. [207] ont montré qu'un béton avec 20% de pouzzolane atteint la même résistance que le béton ordinaire après 28 jours. Par contre, Mouli et Khelafi [201], ont montré que les meilleures résistances à la compression et traction, sont obtenues après 7 jours d'âge pour les bétons contenant 20% de la pouzzolane, et au-delà de 90 jours pour les bétons contenant 30% de la pouzzolane. D'autre part, Mebrouki et al. [206] ont constaté qu'un taux de substitution de 10% représente l'optimal du point de vue gain de résistance. Selon les résultats d'Ezziane et al. [208], le taux optimal est autour de 15 % pour un mortier durcissant sous une température ordinaire et qui

augmente avec l'élévation de la température. En effet, cette pouzzolane est sensible à l'élévation de la température, et son utilisation est très prometteuse en climat chaud.

Dans le cas des BAP, les résultats trouvés par Krachai et al. [210], montrent que la substitution du ciment (CPJ 32.5) à raison de 15% de pouzzolane naturelle de Beni-Saf, engendre une augmentation importante de la résistance à la compression et à la flexion dès le 28<sup>ème</sup> jour. En outre, Adekunle et al. [211], ont trouvé des résistances à la compression de l'ordre de 36-49, 47-56, 65-68 et 70-83 à l'âge de 3, 7, 28 et 90 respectivement pour les BAP contenant de la pouzzolane naturelle. Celik et al. [212], ont montré qu'une substitution de 30% du ciment par la pouzzolane naturelle engendre une augmentation de la résistance de l'ordre de 12 ; 6 et 2% à l'âge de 7 ; 28 et 90 jours respectivement.

L'effet de la finesse de la pouzzolane naturelle a été étudié par plusieurs chercheurs. D'après Khelafi et Kerdal [213], pour 30% de pouzzolane les résistances sont comparables et deviennent supérieures à celles du ciment ordinaire avec l'augmentation de sa surface spécifique. Dans une autre étude, Belhachemi [214] a montré que l'effet de la finesse est beaucoup plus prononcé au jeune âge, où les résistances à deux jours s'améliorent considérablement pour la pouzzolane la plus fine. Par contre, à 28 jours la finesse ne semble avoir qu'un faible effet sur les résistances (Fig. 1.14). En outre, une augmentation des résistances mécaniques (compression et flexion) ainsi qu'une cinétique d'hydratation accélérée pendant la période de durcissement initial (à court terme) a été démontrée par Bouglada [215], Boualla et al. [216], en augmentant la finesse de la pouzzolane.

D'autres chercheurs ont montré l'effet négatif de la pouzzolane naturelle sur le comportement mécanique du béton. En effet, Targan et al. [217] et Ghrici et al. [218] ont trouvé qu'une substitution du ciment par 30% de PN diminue la résistance à la compression par rapport au mortier de contrôle à l'âge de 90 jours par 11 et 15%, respectivement. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Aichoub et al. [198] qui ont trouvé une diminution de 11% de la résistance à la compression à l'âge de 90 jours.

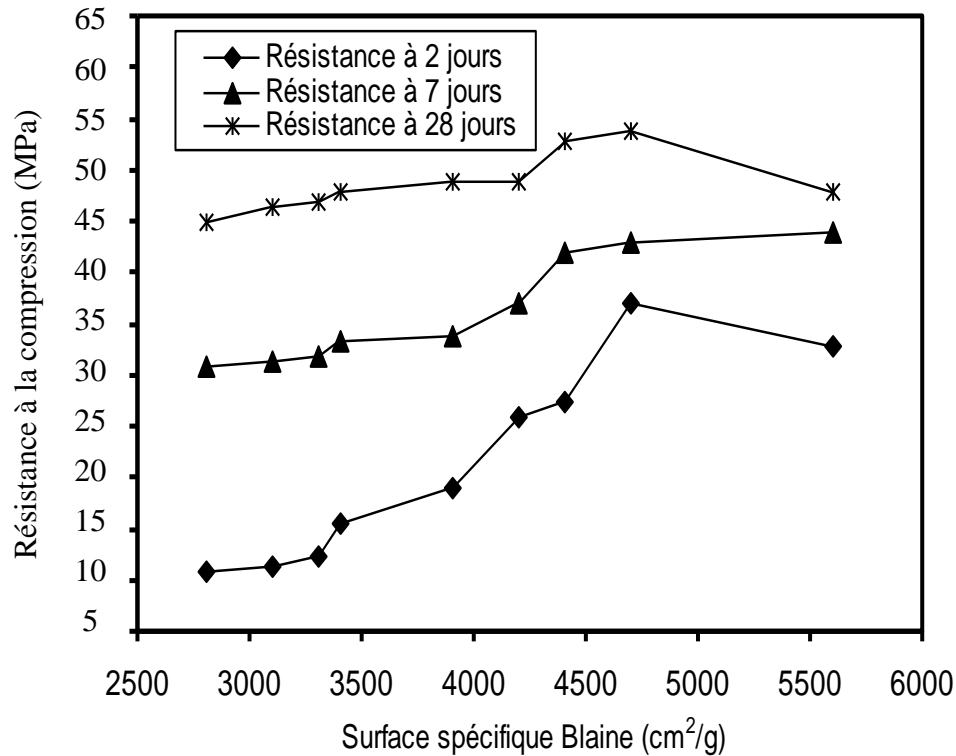


Figure 1.14 : Résistance à la compression du béton en fonction de la surface spécifique Blaine de la pouzzolane de Béni-Saf [214].

#### 1.2.6.2.2. Retrait et gonflement

L'introduction de la pouzzolane dans la composition des mortiers par sa substitution au ciment fait augmenter les déformations libres, lorsque ces mortiers sont conservés à l'air et lorsque le taux de remplacement est supérieur ou égal à 50%. Pour des pourcentages inférieurs, les mortiers pouzzolaniques auront des déformations inférieures à celles du mortier de référence sans pouzzolane comme l'illustre la figure 1.15 [109].

En outre, Kaid et al. [219] ont étudié l'effet de l'incorporation de la pouzzolane naturelle de la région de Beni-Saf sur l'évolution des déformations différées, ils ont trouvé que les déformations du mortier contenant 10 et 15% de pouzzolane naturelle, se rapprochent de celles du mortier témoin. Par contre, celles du mortier contenant 5% d'ajout diminuent d'environ 30%. Guenanou et Khelafi [220], ont trouvé que le retrait des mortiers contenant la pouzzolane naturelle est comparable à celui du mortier témoin à long terme.

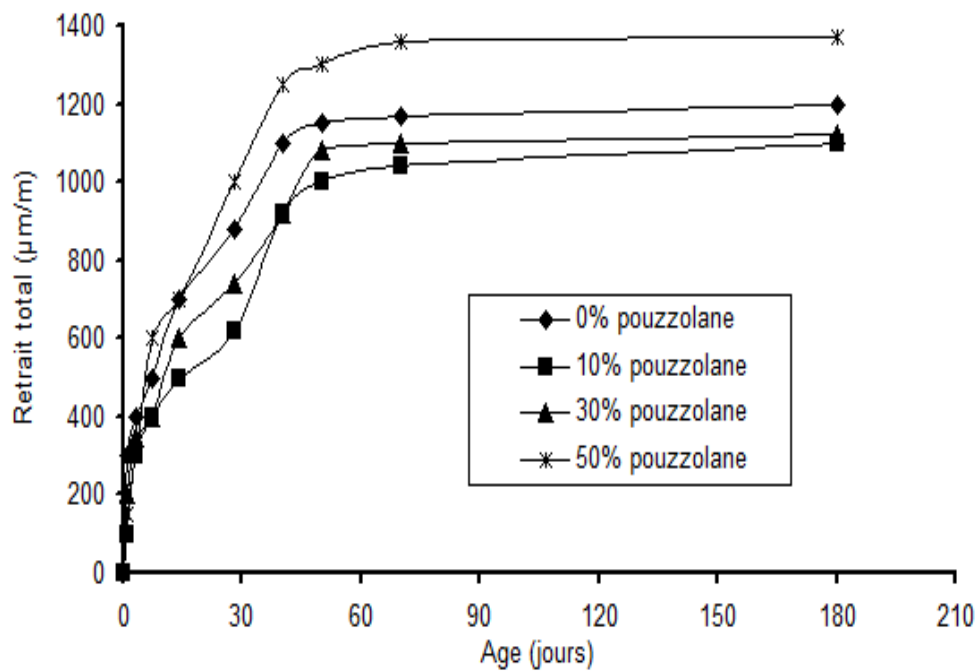


Figure 1.15 : Evolution du retrait total des mortiers pouzzolaniques [109].

### 1.2.6.3. Effet de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des BAP

Les romains utilisaient déjà la pouzzolane dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles. Cette durabilité est due à l'incorporation de la pouzzolane qui améliore la cohésion interne ainsi l'augmentation de la compacité de la pâte de ciment, ce qui réduit la porosité qui en découle pour toute la matrice cimentaire, et se traduit par une réduction de la perméabilité à l'eau, et une protection des armatures contre la corrosion et une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces [218].

La réaction pouzzolanique conduit à une réduction de la chaux libre dans la pâte de ciment et donc réduit le risque d'attaque des sulfates. Saadi [132] a montré en appliquant une cure humide, que La pouzzolane naturelle diminue la perméabilité. De même il a été démontré par Siad et al. [148] que l'incorporation de la pouzzolane naturelle comme un mélange de minéraux dans le béton auto-compactant semble être très bénéfique pour la résistance de ces bétons dans un milieu de sulfate de sodium.

### 1.3. Effet de la température de murissement sur les propriétés des BAP

#### 1.3.1. Généralités

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. Par ailleurs, les BAP peuvent être exposés à des températures élevées soit dans les conditions climatiques extrêmes, soit pour des éléments massifs en béton, 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 devient nécessaire.

Dans les conditions de température élevée, la pâte de ciment subit des changements physiques et chimiques susceptibles d'affecter significativement les propriétés mécaniques et la durabilité des structures en béton. L'interaction entre les conditions atmosphériques ambiantes et la chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment, engendre un gradient de température et une dessiccation qui peuvent conduire à une chute de résistance, à une fissuration ou à une détérioration de la durabilité [222].

#### 1.3.2. Propriétés mécaniques instantanées

##### 1.3.2.1. Résistance à la compression

L'élévation de la température affecte le système d'hydratation du ciment en altérant la période dormante et le changement de la morphologie des hydrates formés ainsi que la quantité d'ettringite. Cette formation a des conséquences négatives sur la microstructure par une importante porosité et une distribution non uniforme des hydrates [63, 223, 224]. En effet, les résistances mécaniques au jeune âge sont souvent améliorées tandis que les valeurs ultimes sont réduites par rapport à celles correspond à une température normale [225-227]. En plus, pour des températures supérieures à 70°C sous une humidité relative élevée, les bétons sont soumis à une expansion causée par la formation retardée d'ettringite [228].

Un béton qui durcit sous une température élevée se caractérise par une accélération de son 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 et plus la résistance au jeune âge est élevée aussi. Cette augmentation dépend du type de bétons, type et taux d'additions et l'humidité de cure [222, 229-237].

D'après plusieurs chercheurs, l'amélioration des résistances au jeune âge est due à une formation accélérée des CSH et à une dissolution rapide des cristaux. A long terme, les hydrates formés n'ont pas eu le temps de s'arranger convenablement, ce qui a un effet négatif sur la microstructure du ciment durci par l'augmentation de sa porosité, la diminution de ses résistances ultimes et la détérioration de sa durabilité [223, 238]. Bakharev et al. [239] et Mirza et al. [240] attribuent cette chute au nombre important d'hydrates précipités sous une température élevée et qui constituent des barrières contre la diffusion des ions ce qui cause une hétérogénéité dans la pâte et une réduction des résistances.

D'autres chercheurs expliquent cette diminution qu'au départ, la réaction d'hydratation est thermoactive et le degré d'hydratation évolue rapidement lorsque la température augmente, ce qui conduit à la formation des hydrates plus faibles mécaniquement et leur distribution est non uniforme, et par conséquent des faibles résistances à long terme [241-244]. Dent et Kataok [245] 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.

L'effet de température élevée est aussi varié selon le type de béton, vibré, autoplaçant ou de haute performance. Des travaux menés par Tan et Gjorv [246], ont montré que l'effet de la température de murissement 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 une diminution 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 BHP. Les auteurs relient cela, au fait que, les grains de ciment sont tellement proches de façon que la quantité des hydrates formées 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, causé par l'augmentation de la température de murissement, n'affecte pas la résistance à long terme.



Pour le cas des bétons autoplaçants, les travaux effectués par Gidion et Marios [247], Derabla et Larbi [127] et Aggoun et al. [248] ont montré que l'augmentation de la température de cure, n'entraîne pas une grande diminution dans les résistances des BAP à long terme. De plus, les études de Reinhardt et Stegmaier [249] et Aparicio et al. [250], ont montré qu'il n'y a pas d'effet négatif de température élevée sur les BAP à haute résistance. Du même, Boukni et al. [140] ont trouvé que l'élévation de la température initiale des BAP de 20°C à 50°C favorise les résistances mécaniques à la compression à toutes les échéances étudiées (1 ; 7 et 28 jours). C'est un fait qui, dans le même contexte expérimental, n'était pas visible pour les bétons vibrés.

Ramezani pour et al. [233] ont étudié l'effet du traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité d'un BAP. Les auteurs ont examiné l'effet de deux températures différentes (60 et 70°C) avec trois durées de cure (16 ; 18 et 20 h). Cette étude a montré que l'élévation de la température de cure augmente les résistances initiales ce qui est due à l'amélioration des produits d'hydratation (gel de C-S-H et cristaux de CH). Cependant, à l'âge de 90 jours les résistances ont été relativement les mêmes. En plus les meilleurs résultats pour la résistance mécanique et la perméabilité à l'eau, ont été trouvés pour une température de 60°C. Les auteurs ont trouvé également que plus on augmente la durée du traitement thermique, plus les résistances mécaniques sont améliorées.

#### 1.3.2.2. Vitesse ultrasonique

Dans les travaux de Derabla et Larbi [127], les auteurs ont trouvé une faible corrélation entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression dans les BAP traités thermiquement par rapport au BAP muris dans les conditions normales. Ce qui est dû à la nature différente des additions minérales utilisées, ainsi la porosité élevée des BAP muris à 60°C qui affecte la propagation des ondes ultrasoniques. Par contre, Gesoğlu [251] a montré que les bétons traités thermiquement avaient des valeurs de vitesses ultrasoniques légèrement supérieures au béton durci dans les conditions normales à 1 jour, et qu'il n'y avait aucune différence remarquable dans les valeurs de la vitesse des bétons à partir de 7 jours.

#### 1.3.2.3. Module d'élasticité (en compression)

A notre connaissance, il y a peu d'études sur l'évolution du module d'élasticité en fonction de la température du mûrissement. Boukni [252] dans ses travaux a trouvé que, les

modules d'élasticité des BAP conservées à 20°C sont toujours supérieurs à ceux des BAP recevant un étuvage, et ceci quel que soit la température de mûrissement. Ce qui est confirmé par Reinhardt et Stegmaier [249], qui ont trouvé une diminution du module d'élasticité des BAP muris à 60°C par rapport aux ceux à 20°C. Chopin et al. [253] ont montré que lorsque les éprouvettes sont conservées à une température de mûrissement élevée aux très jeunes âges, les déformations instantanées des BAP étudiés n'étaient pas plus élevées que celles du BV.

Par contre, d'autres auteurs ont montré que le module d'élasticité à la compression, n'est pas affecté par l'augmentation de la température de cure (50°C-55°C) [226, 254]. En effet, Mouret [255] met en évidence que le module sécant à la compression, à 30% de la charge de rupture n'est pas modifié par l'augmentation de la température de cure de 20 à 35°C durant les premières heures de l'hydratation, pour une classe de résistance donnée.

Aggoun et al. [248] ont rapporté 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. Zevcovic [256] a trouvé également, que l'influence de l'augmentation de la température sur le module d'élasticité est qualitativement la même que sur la résistance à la compression.

#### 1.3.2.4. Retrait

Les résultats apparaissent controversés concernant la comparaison du retrait entre BAP et béton vibré (BV) à température ambiante. A notre connaissance, il y a que l'étude de Choppin et al. [253] qu'ont montré que les retraits (endogènes, totaux) des BAP et des BV à température de mûrissement élevée ne sont pas différents. Les auteurs ont réalisé un programme expérimental dans lequel cinq différents BAP (volume de pâte variant de 32 à 39% du volume de béton, G/S variant de 1 à 1,2) et un béton vibré à faible dosage par comparaison aux BAP (volume de pâte de 25%, G/S=1,3) ont été mis en œuvre. Tous les bétons ont été curés pendant 18 heures selon un cycle de température utilisé en préfabrication avec un palier maximum à 60°C. Les résultats ont montré que les déformations (endogènes et totales) des BAP ne sont pas significativement plus élevées que celles mesurées sur le BV. Les auteurs ont conclu que ni l'absence de vibration, ni la nature du superplastifiant utilisé ne semblent avoir une influence sur les retraits du béton autoplaçant.

### 1.3.3. Propriétés de transport et durabilité

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.

#### 1.3.3.1. Porosité

Reinhardt et Stegmaier [249] 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 pores capillaires de petites tailles (au voisinage de 0,1µm). Les auteurs ont montré également 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 leur volume total dans le béton.

Mouret et al. [257] 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 (22 et 35MPa) et la nature granulaire (siliceux ou calcaire poreux). Gallucci et al. [258] 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 maintenue jusqu'aux essais. Les auteurs ont observé que la porosité est d'autant plus forte que la température augmente.

#### 1.3.3.2. Absorption capillaire

Selon Mouret et al. [257], la température de mûrissement élevée aux jeunes âges ne modifie pas l'absorption initiale (première heure d'absorption) des bétons à l'âge de 28 jours, mais une augmentation de leur absorptivité évaluée entre 1 heure et 24 heures d'absorption. Ils ont conclu alors que les baisses de résistance enregistrées avec la température plus élevée sont liées à une augmentation de la proportion des pores capillaires les plus fins.

En outre, Ramezani pour et al. [234] ont trouvé que l'augmentation de la température de cure de 60 à 70°C ne présente pas une amélioration dans la durabilité (l'imperméabilité) du BAP en termes d'absorption capillaire. Cela pourrait être dû à la formation rapide du gel de

C-S-H et CH qui conduit à une structure hétérogène et des pores plus grossiers. Du même, Ho et Cao [259] ont exploré l'effet du traitement thermique (55°C pendant 8h) sur la porosité des mélanges de béton incorporant diverses combinaisons de cendres volantes, laitier granulé et fumée de silice. Il a été constaté sur la base de leur sorptivité, que les bétons muris à une température élevée sont plus poreux par rapport au béton curé dans un milieu standard.

#### 1.3.3.3. Perméabilité aux gaz

Boel et al. [260] ont montré une diminution de la perméabilité dans les BAP (à base de filler calcaire), à rapport E/C constant, quelle que soit la nature du ciment utilisé (après 3 mois de cure humide). Mouret et al. [257] n'ont pas observé de variation de la perméabilité à l'air à 28 jours d'âge avec l'élévation de la température de cure, les autres paramètres étudiés étant fixés (température initiale du béton, classe de résistance du béton et nature granulaire).

#### 1.3.3.4. Diffusion des ions chlore

Peu d'études traitent de l'évolution de la résistance à la diffusion des ions chlore dans les BAP ayant subi une cure à des températures élevées. La comparaison BAP/BV à température ambiante montre que les coefficients effectifs sont similaires [74]. Zhao et al. [231] observent que le coefficient de diffusion d'un BAP après 28 jours d'âge n'est pas modifié même si les bétons sont soumis depuis leur confection à des températures de 28 à 32°C. El-Chabib et Ibrahim [261] ont mesuré la pénétration des ions chlorure par conductivité électrique sur des bétons très fluides ( $D_{\text{étalement}} \geq 580\text{mm}$ ) à base d'additions minérales (laitier et cendre volante) à l'échéance de 56 jours. Tous les bétons ont été soumis à une cure humide de 7 jours (température du laboratoire) puis, laissés soit à l'air libre à la température du laboratoire, soit placés dans une étuve à 46°C jusqu'à le jour d'essai. Les auteurs ont montré que la cure à température élevée entraîne des susceptibilités plus faibles à la migration. Cette observation est vraie quelle que soit la composition étudiée.

#### 1.3.4. Effet combiné des additions minérales et de la température sur les propriétés des BAP

Neville [63] a précisé que la présence des additions minérales empêche la formation de produits avec la structure ouverte dans le béton qui est soumis à la haute température. Turkel et Alabs [262] ont rapporté que les ciments composés fonctionnent bien sous traitement thermique. Les effets négatifs provoqués par l'augmentation de température

peuvent être minimisés par l'utilisation des additions minérales, telles que la pouzzolane naturelle, les cendres volantes ou le laitier granulé de haut fourneau. En fonction de leurs caractéristiques et leurs taux de remplacement, ces additions peuvent modifier la cinétique d'hydratation, réduire le dégagement de chaleur et produire des hydrates CSH supplémentaires. Ils donnent au béton une performance remarquable dans les climats chauds où l'effet négatif de la température est réduit [238, 263-266].

Videla et al. [267] ont étudié le comportement du ciment Portland et du ciment avec additions à diverses températures de durcissement (5 ; 20 et 30 °C), ils ont observé que la résistance du ciment mélangé montre des courbes croissantes avec l'augmentation de la température. Mirza et al. [240] ont révélé que l'introduction des additions pouzzolaniques tels que la poudre de tuf, le laitier et les fumées de silice, permet d'améliorer les performances et la résistance des mortiers et bétons exposés à une température plus élevée que la normale, en particulier dans la plage de 35 à 50°C. Kim et al. [254] ont montré également que l'emploi d'un liant ternaire (ciment type V (ajout non précisé) + cendre volante) maintien ou améliore les résistances à 28 jours entre 23 et 50°C (maintien des conditions de cure jusqu'à 28 jours).

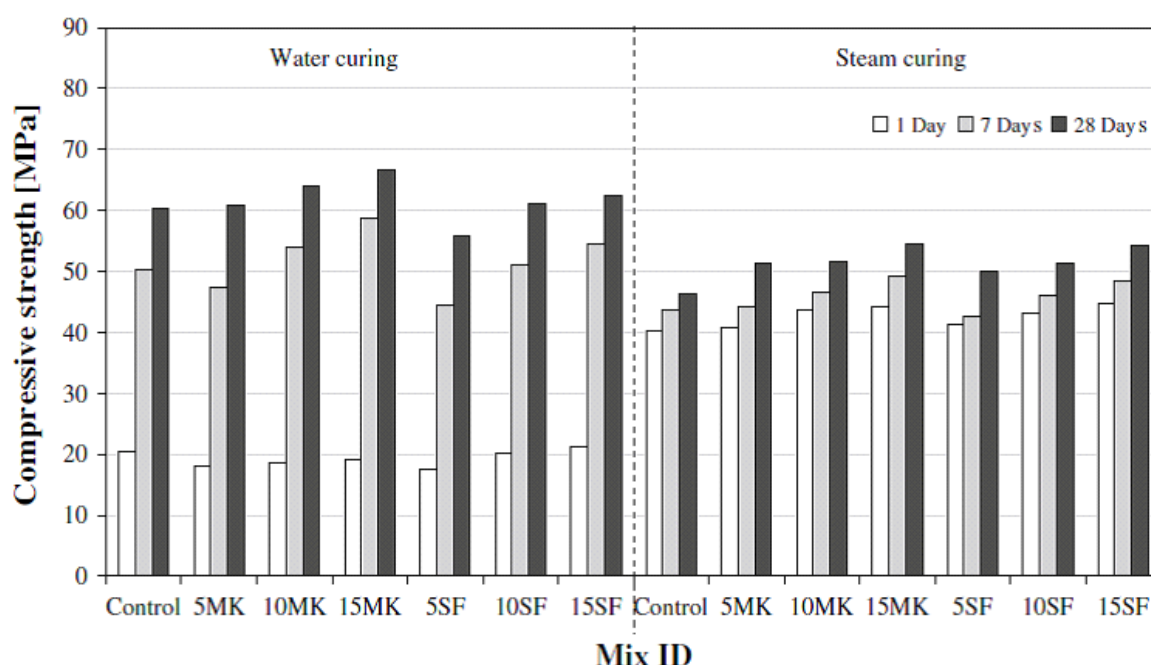


Figure 1.16 : Résistance à la compression du béton en fonction du pourcentage d'addition et mode de cure [251].

Gesoğlu [251] a étudié l'effet du traitement thermique sur les propriétés d'un béton ordinaire incorporant des additions minérales (fumée de silice et métakaolin). Il a trouvé que l'augmentation de la température, fait diminuer les résistances mécaniques à partir du 7<sup>ème</sup> jour, et augmenter la perméabilité aux ions chlore par rapport au béton muris dans les conditions normales. Pour les deux modes de murissement, l'auteur a remarqué l'effet bénéfique des additions employées sur la résistance et la perméabilité du béton. Cet effet positif est d'autant plus important que le pourcentage d'addition augmente dans le béton (Fig. 1.16).

Sur des niveaux de résistance plus grandes, Tan et Gjørsv [246] ont montré que l'effet de la température de murissement 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. 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 BHP. Les auteurs ont relié cela, au fait que, les grains de ciment sont tellement proches de façon que la quantité des hydrates formées 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, causé par l'augmentation de la température de murissement, n'affecte pas la résistance à long terme. Du même, Kanstad et al. [226] ont rapporté que l'incorporation d'addition minérale telle que la fumée de silice ou cendres volantes permet de maintenir la résistance lorsque la température de mûrissement augmente de 20 à 55°C dans des bétons de hautes performances (70 à 80 MPa).

Dans un contexte de préfabrication qui demeure d'intérêt dans l'étude de l'effet de la température de mûrissement sur les résistances, Reinhardt et Stegmaier [249] ont comparé les comportements d'un ensemble de bétons mûris à différents cycles de température de telle façon que leur maturité soit équivalente à celle d'une conservation de 3 jours à 20°C. Les résultats trouvés, ont montré que l'élévation de la température augmente les micropores et n'influençant pas la résistance.

Pour le cas des BAP, Derabla et Larbi [127] ont étudié l'effet de l'incorporation des additions minérales (fillers calcaire, laitier granulé et laitier cristallisé) sur le comportement d'un BAP traité thermiquement. L'étude a montré qu'un traitement thermique à une température de 60°C pendant 24h est très bénéfique, surtout à jeune âge, comme tous les BAP

traités thermiquement ont développé une résistance supérieure à celle des BAP non traités. A long terme, une perte minimale de la résistance a été produite. L'utilisation des fillers calcaire et laitier granulé semble plus favorable si son incorporation est limitée à moins de 20%. Le LG peut être plus bénéfique si sa finesse ne dépasse pas celle de la poudre de ciment.

Sur un large domaine de température de cure de 20 ; 40 ; 60 et 80°C, Monzo et Borrachero [268] ont démontré que 40°C présente la température de cure optimale pour la résistance d'un ciment aux cendres volantes. Du même Escalante-Garcia et Sharp [223] dans autres travaux, conclurent que 30°C est l'optimum pour le développement des résistances d'un ciment composé au laitier.

Pour des aspects de durabilité, il apparaît que la matrice cimentaire ternaire (clinker, filler calcaire, laitier) semble plus performante comparativement aux matrices binaires uniquement fillérisées. On peut dire que l'effet chimique résultant de l'hydratation latente du laitier pour la matrice ternaire (clinker + filler + laitier) semble plus efficace que le simple effet physique (augmentation de la compacité) engendré par l'incorporation de filler calcaire dans les matrices binaires (clinker + filler). Ramezani pour et al. [233] ont montré également l'effet bénéfique d'emploi des additions minérales sur la durabilité des bétons traités thermiquement. Ceci est dû à la formation rapide des produits d'hydratation (C-S-H et CH) en remplissant les pores internes.

#### 1.3.4.1. Fillers Calcaire

Ramezani pour et al. [234] ont étudié l'effet de 36 différents cycles de traitement thermique sur le comportement d'un BAP à base de calcaire. Les auteurs ont prouvé que l'augmentation de la température maximale du cycle (entre 50 et 70°C) a un effet négatif sur la résistance à la compression du béton à des âges plus avancés, tout en améliorant sa résistance immédiate après durcissement.

Boukni [252] a étudié l'évolution des propriétés mécaniques des BAP avec trois différents dosages en fillers calcaires F/L (BAP3 : 0,42 ; BAP4 : 0,25 et BAP5 : 0,10) ayant subis un traitement thermique à jeune âge. Les bétons testés, après démoulage, sont met en étuve pour des températures de 40 et 60°C pendant 24h puis laissés à l'air ambiant jusqu'aux échéances des essais. A travers cette étude, les essais de résistance à la compression ont permis de mettre en évidence que l'augmentation de la température de cure permet d'obtenir

des résistances plus importantes aux jeunes âges. Par contre, des températures trop élevées peuvent modifier la structure des hydrates et dégrader les résistances après 7 jours. L'auteur a justifié cette variation par le taux initial élevé d'hydratation, qui n'a pas permis une diffusion des produits d'hydrations loin des particules anhydres de ciment, ni une précipitation uniforme dans la porosité. La pâte de ciment obtenue est donc plus poreuse et moins résistante pour les échéances plus importantes. À 40°C l'auteur a enregistré les résistances maximales pour toutes les échéances dans le cas de BAP3 et BAP4.

#### 1.3.4.2. Pouzzolane naturelle

Dans les travaux sur le ciment à la pouzzolane naturelle de Beni-Saf, Ezziane et al. [208] ont montré que pour des faibles taux de substitution (10 et 20%), les résistances finales sont moins dégradées par l'élévation de la température et restent supérieures à celles d'un ciment sans pouzzolane. Mais pour des taux de substitution élevés de 30 et 40%, les résistances finales sont plus sensibles à l'élévation de température avec une amélioration importante autour de 40°C.

#### 1.3.4.3. Laitier

L'effet bénéfique du laitier granulé dans des températures élevées a été indiqué par plusieurs chercheurs. En effet, Pratas [269] et Kellouch et Bougara [232] ont étudié l'effet d'incorporation de 50% du ciment par des laitiers sur des bétons muris à des températures allant de 20 à 40°C. Selon les résultats obtenus, l'augmentation de la température a un effet positif sur la résistance des ciments avec 50% de laitier pour tous les âges, contrairement au ciment sans additions qui présente une chute de résistances après le septième jour. De plus, Kellouch et Bougara [232] ont déduit que la température de 40°C est la température la plus favorable pour l'hydratation des ciments au laitier.

Les résultats des essais effectués par Wainwright et Tolloczko [184] sur un béton avec un rapport E/C de 0,41 incorporé de 0 ; 50 et 70% de laitier et soumis à une température élevée, montrent clairement que, tous les bétons traités thermiquement ont développé des résistances à jeune âge supérieures à 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 présentent des résistances similaires à celles des bétons dans les conditions ordinaires.



Berkani [270] a étudié l'effet des additions minérales (laitier granulé, pouzzolane naturelle et fillers calcaires) sur le comportement des mortiers normales sous des températures de cures allant de 20 à 80°C. Les résultats ont montré l'effet néfaste des hautes températures sur le comportement du mortier quel que soit la nature de l'addition incorporée. Par ailleurs les résultats démontrent que le laitier s'avère le matériaux qui supporte le mieux les températures élevés notamment à 60°C où il développe les meilleurs résistances.

Amrane et Kenai [176] ont étudié la résistance à la compression de cinq types de bétons dont le ciment a été substitué par 0 ; 15 ; 30 et 40 % de laitier d'El-Hadjar et conservés dans l'eau, à l'intérieur du laboratoire et dans trois environnements simulant un climat chaud. Les résistances du béton au laitier sont faibles au jeune âge comparées à celles du béton témoin. Par contre, à long terme, elles deviennent comparables si non meilleures.

Les résultats montrés par Behim et al. [271], ont mis en évidence les performances des ciments aux laitiers conservés sous des températures élevées où leurs résistances sont moins dégradables que celles des ciments ordinaires. Ezziane [102] a trouvé une réduction moins importante des résistances finales pour le ciment au laitier. Cela est dû à la production de nouveaux hydrates (CSH) qui comblent les vides et améliorent la microstructure. Pour 50% de laitier, nous remarquons que 40°C représente une température optimale pour obtenir une activité maximale du laitier, ce qui concorde avec les conclusions de Monzo et Borrachero [268] qui ont suggéré la même température optimale.

Dans le même contexte, Weisheit et al. [272] ont montré que, lorsque les éprouvettes de BAP incorporant un ciment au laitier sont conservées à une température de mûrissement élevée aux très jeunes âges (30°C durant 16 heures puis conservation dans l'eau à 20°C), les résistances sont plus élevées à court terme et équivalentes dès 7 jours, à la référence mûrie à 20°C (Fig. 1.17). L'emploi d'un ciment au laitier peut donc être d'intérêt pour contrecarrer les effets préjudiciables d'une température de cure élevée.

Charbel [235] a étudié les performances des différents BAP préparés avec trois différents types de liant (5% SF + 25% S, 5%SF + 50%S et 70% S), deux températures de murissement ont été choisies, l'une chaude (35 °C) et l'autre conventionnelle (20 °C). Cette étude a montré que la substitution de 25 à 50% du ciment par du laitier, n'a pas pénalisé la résistance à jeune âge dans les conditions chaudes ou l'énergie d'activation augmente avec la

teneur en laitier. L'élévation de la température a augmenté considérablement la résistance à jeune âge sans diminuer la résistance à 56 jours.

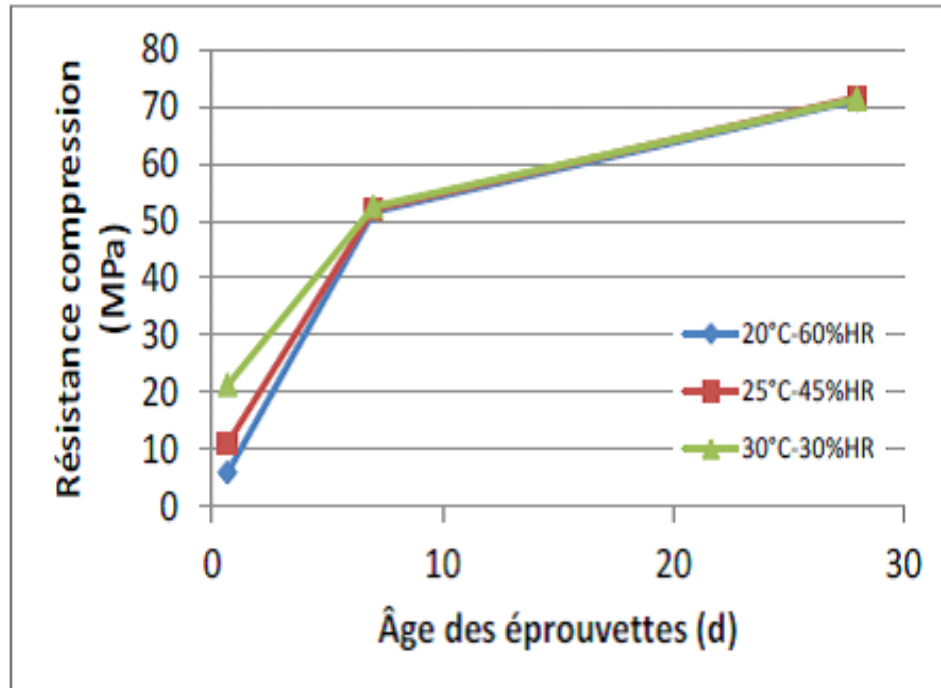


Figure 1.17 : Evolution des résistances à 16h, 7j et 28j avec l'élévation de la température de cure d'un BAP incorporant un ciment CEM III/A [272].

#### 1.4. Synthèse de la revue bibliographique

Cette synthèse bibliographique a été menée pour mettre les points sur les connaissances relatives aux caractéristiques des bétons autoplaçants à l'état frais et durci ainsi que l'effet des additions minérales et la cure à des températures élevées sur leurs 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 pendant les deux dernières décennies. Ces 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 conséquent de ses spécifications de formulation qui nécessitent un faible rapport Eau/Poudre et un volume de fines élevé, 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 et 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 utilisée 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**

# **CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES**

## CHAPITRE 2

### CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCEDURES EXPÉRIMENTALES

#### 2.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux utilisés et les techniques expérimentales réalisées dans notre étude. On présente en première partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux utilisés dans la composition de nos bétons autoplaçants, à savoir : le ciment, les additions minérales (fillers calcaires, laitier granulé et pouzzolane naturelle), les granulats (sable et gravier), l'adjuvant et l'eau de gâchage. Dans une seconde partie, on exposera la méthode de formulation adoptée pour les différentes compositions des bétons autoplaçants ainsi la technique suivie pour le traitement thermique. Nous présenterons par la suite les différents essais réalisés et leurs modes opératoires (état frais et durci).

#### 2.2. Caractérisation des matériaux utilisés

##### 2.2.1. Ciment

Le ciment utilisé pour la préparation des différents mélanges est un ciment portland artificiel (CEMI) de classe 42,5 provient de la cimenterie d'Ain El Kebira (Sétif, Algérie). 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 ciment sans ajouts. La composition chimique et les propriétés physico-mécaniques de ce ciment sont présentées dans les tableaux 2.1 et 2.2 et figure 2.1.

Tableau 2.1 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEM I 42.5 utilisé

Composition chimique (%)									
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl	PF
63,57	20,18	3,75	4,74	2,12	2,67	0,55	0,69	0,01	1,72
Composition minéralogique (%)									
C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> A		C <sub>4</sub> AF			
57,3		25,5		6,6		10,6			

Tableau 2.2 : Caractéristiques physico-mécaniques du ciment CPA CEM I 42.5 utilisé

Caractéristique		Ciment	Norme
Finesse (cm <sup>2</sup> /g)		3370	NF EN 196-6 [273]
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )		3,15	
Consistance normale (%)		27	NF EN 196-3 [274]
Temps de prise (min)	Début	170	
	Fin	255	
Résistance à la compression à 28 j (MPa)		≥ 42,5	NF EN 196-1 [275]

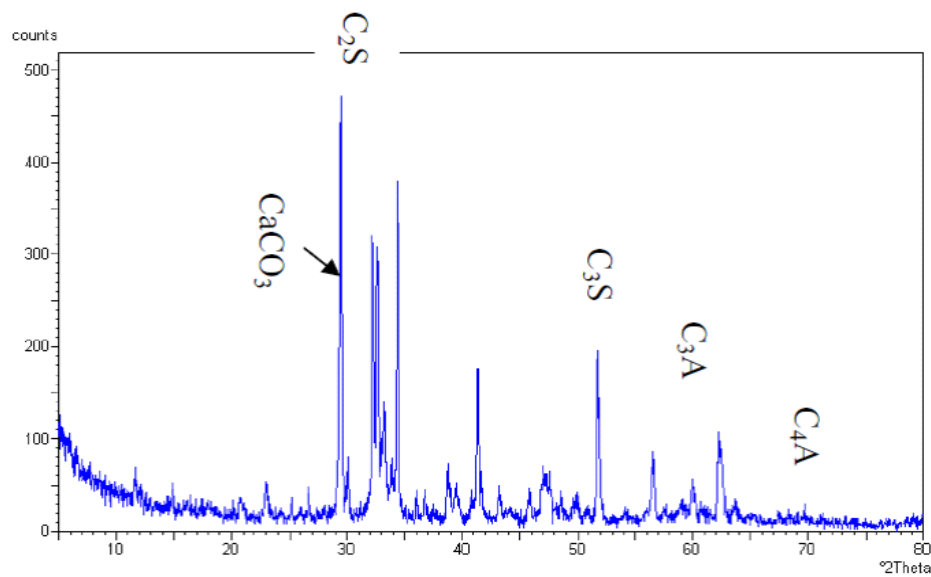


Figure 2.1 : Analyse chimique par DRX du ciment utilisé.

### 2.2.2. Additions minérales

Nous avons utilisé dans notre étude trois (03) additions minérales les plus utilisées dans le pays pour la substitution du ciment, à savoir le calcaire, le laitier granulé et la pouzzolane naturelle (Fig. 2.4). Afin de pouvoir utiliser ces additions dans les différentes formulations du béton autoplaçant (BAP), nous avons procédé à leur étuvage à 50°C jusqu'à l'obtention d'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<sup>2</sup>/g). Pour le broyage du laitier et de la pouzzolane naturelle, nous avons utilisé un broyeur à boulets du laboratoire de Génie Civil de l'Université de Blida (Fig. 2.2). Le broyage du calcaire a été réalisé avec un broyeur à disque au niveau du Hall de Technologie de l'Université de Médéa (Fig. 2.3).



Figure 2.2 : Broyeur à boulets.



Figure 2.3 : Broyeur à disque.

L'étude de l'activité (pouzzolanicité) des additions minérales utilisées dans cette étude a été menée par la méthode mécanique sur des mortiers normalisés en substituant 15% de la masse du ciment par l'une des additions minérales et conformément aux recommandations de la norme EN 196-1[275].

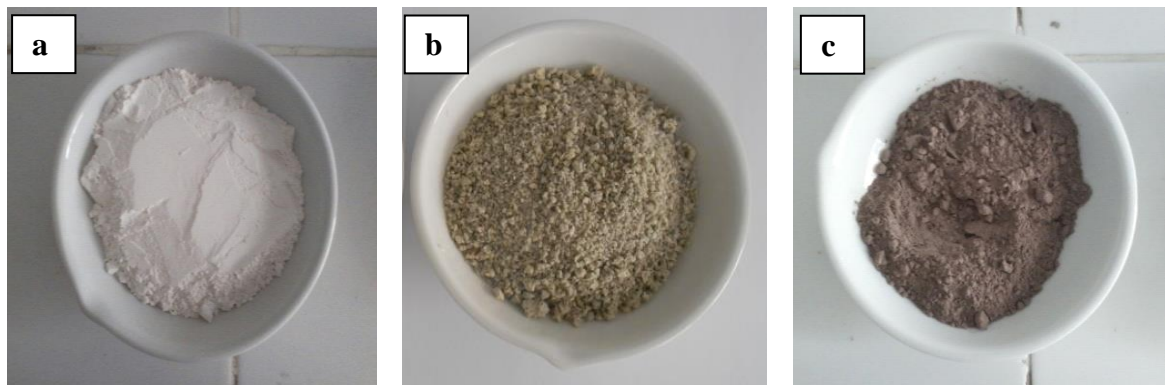


Figure 2.4 : Additions minérales utilisées (a/ calcaire, b/ laitier ; c/ pouzzolane).

### 2.2.2.1. Calcaire

Le calcaire utilisé dans notre étude, est extrait de la carrière d'Ogaz (Sig, Mascara, Algérie) et fourni par la cimenterie de LAFARGE (Fig. 2.4.a). Cette addition de couleur blanche jaunâtre est fournie sous forme de pierres concassées et ensuite broyée avec un temps de broyage de 8 min pour 50 g. Les caractéristiques chimiques et physico-mécaniques de ce calcaire, sont reportées sur le tableau 2.3. La figure 2.5 présente la forme de ces grains visualisée par le MEB et le diffractogramme DRX présenté dans la figure 2.6, montre que le filler calcaire utilisé contient principalement de la calcite (teneur en  $\text{CaCO}_3$  est 95,80 %).

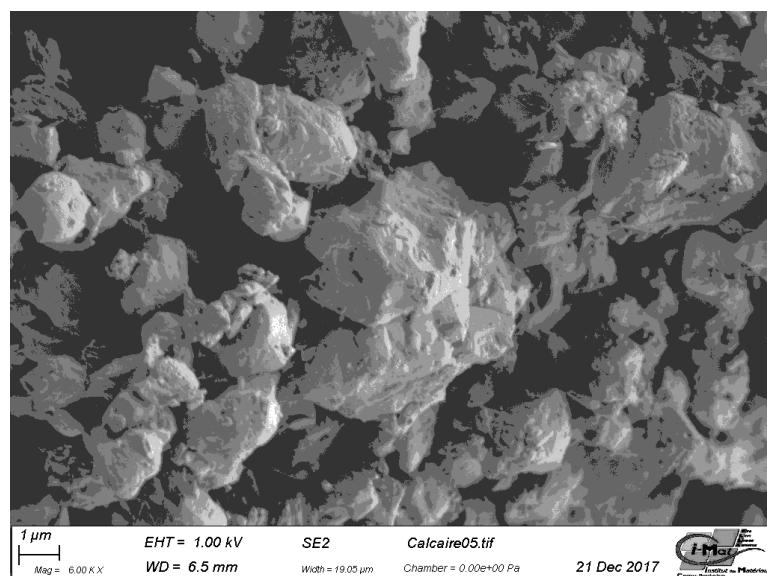


Figure 2.5 : Structure morphologique des grains de calcaire.



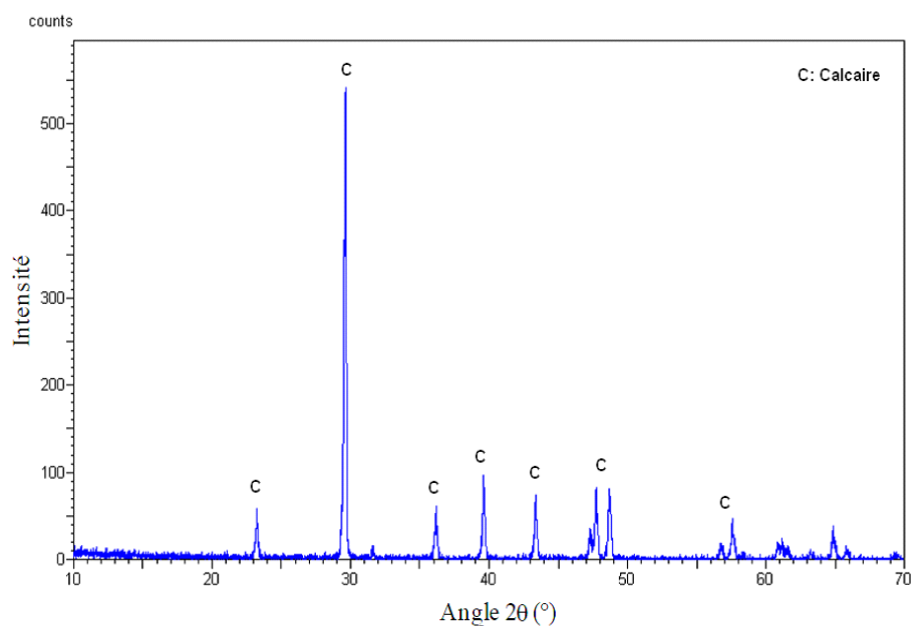


Figure 2.6 : Analyse chimique par DRX du filler calcaire utilisé.

Tableau 2.3 : Caractéristiques chimiques et physico-mécaniques du calcaire utilisé

Composition chimique (%)									
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF
53,08	1,42	0,91	0,56	0,43	0,50	0,60	0,52	0,08	41,90
Caractéristiques physico-mécaniques									
ρ (g/cm <sup>3</sup> )	SSB (cm <sup>2</sup> /g)	Indice d'activité I (%)							
		7 jrs	28 jrs	90 jrs					
2,54	3560	84	88	89					

#### 2.2.2.2. Laitier granulé

Le laitier utilisé dans cette étude provient du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba, Algérie). Il est fourni sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm et de couleur blanche jaunâtre (Fig. 2.4.b). Le laitier est ensuite réduit en poudre avec une finesse comparable à celle du ciment avec un temps de broyage de 125 min. Ses caractéristiques chimiques et physico-mécaniques sont présentées dans le tableau 2.4 et la forme de ses grains visualisée par le MEB est présentée aux figures 2.7.

L'exploitation quantitative du diagramme de diffraction des rayons X présenté dans la figure 2.8, montre la présence de structure amorphe et vitreuse à 97 % du laitier d'Elhadjar, expliquée par l'absence de raie de diffraction dans le diffractogramme de rayons X. Ainsi la présence de deux pics caractéristiques correspondant à la calcite et au fer ce qui est un indice de bonne réactivité de ce laitier.

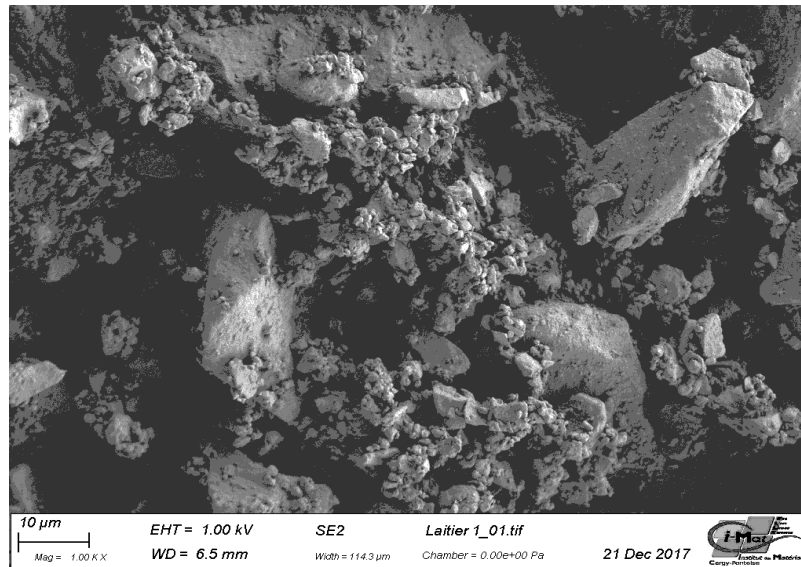


Figure 2.7 : Structure morphologique des grains de laitier.

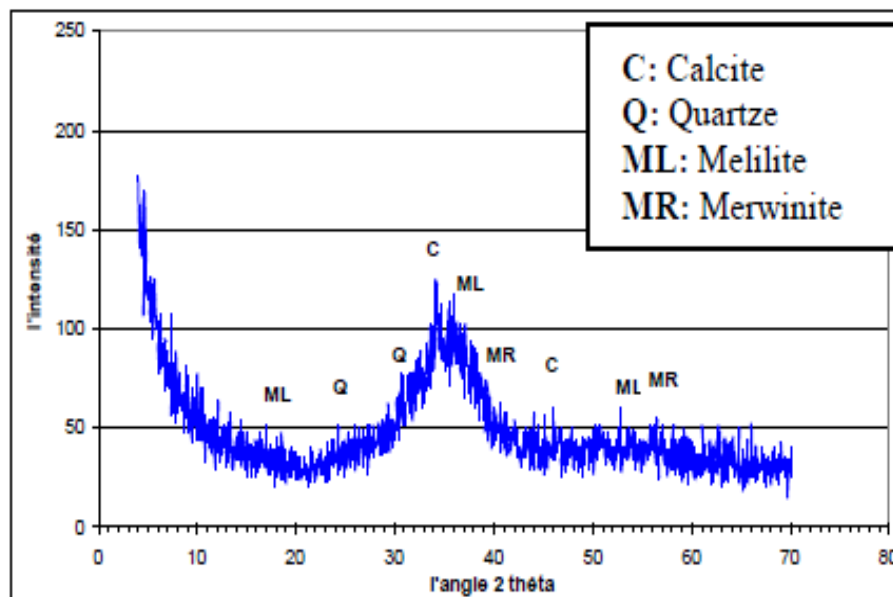


Figure 2.8 : Analyse chimique par DRX du laitier d'El Hadjar utilisé.

Tableau 2.4 : Caractéristiques chimiques et physico-mécaniques du laitier utilisé

Composition chimique (%)									
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	PF
42,20	40,10	6,00	2,00	4,70	2,60	0,13	1,17	1,10	00
Caractéristiques physico-mécaniques									
ρ (g/cm <sup>3</sup> )	SSB (cm <sup>2</sup> /g)	Hydraulicité M <sub>b</sub>	Indice d'activité I (%)						
			7 jrs	28 jrs	90 jrs				
2,85	3450	1,32	83	91	96				

La qualité du laitier est peut être appréciée aussi par son degré d'hydraulicité  $M_h$  représenté par l'équation 2.1 [276]. Si le degré d'hydraulicité est supérieur à 1, le laitier est jugé suffisamment réactif. Wainwright et Rey [277] ont rapporté aussi qu'une des mesures de la réactivité du laitier est son module de basicité (Eq. 2.2), plus le module est élevé plus le laitier est réactive. Dans notre cas,  $M_h = 1,32$  et  $M_b = 1,017$ . Donc, le laitier est basique, ce qui le rend apte à l'activation alcaline.

$$M_h = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \quad (2.1)$$

$$M_b = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \quad (2.2)$$

### 2.2.2.3. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane utilisée est de couleur grise rougeâtre (Fig. 2.4.c). Cette pouzzolane provient du gisement de Bouhamidi (Béni-Saf, Ain Témouchent, Algérie) et fournie aussi par la cimenterie de LAFARGE sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scorie, de diamètres variant entre 50 et 100 mm. Ces roches sont ensuite broyées pour avoir une poudre de finesse comparable à celle du ciment avec un temps de broyage de 45 min. Les résultats de ses caractéristiques chimiques et physico-mécaniques sont présentés dans le tableau 2.5, et la forme de ses grains visualisée par le MEB est présentée dans la figure 2.9.

Tableau 2.5 : Caractéristiques chimiques et physico-mécaniques de la pouzzolane utilisée

Composition chimique (%)									
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF
10,50	47,97	17,54	10,50	3,80	0	0,40	1,50	3,40	4,39
Caractéristiques physico-mécaniques									
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	SSB (cm <sup>2</sup> /g)	Indice d'activité I (%)							
		7 jrs	28 jrs	90 jrs					
2,59	3490	85	88	91					

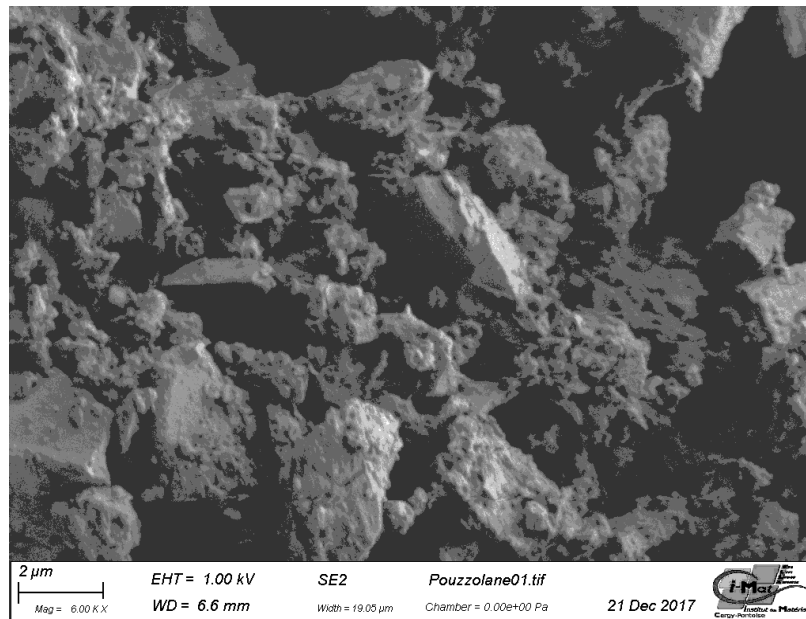


Figure 2.9 : Structure morphologique des grains de la pouzzolane.

L'analyse chimique par diffraction des rayons X de la pouzzolane après son broyage est présentée à la figure 2.10. L'examen de son diffractogramme DRX, montre qu'elle est constituée de minéraux cristallins riches en silice, alumine, fer et magnésium avec des minerais d'argile (montmorillonite ...) plongés dans une masse amorphe (verre volcanique).

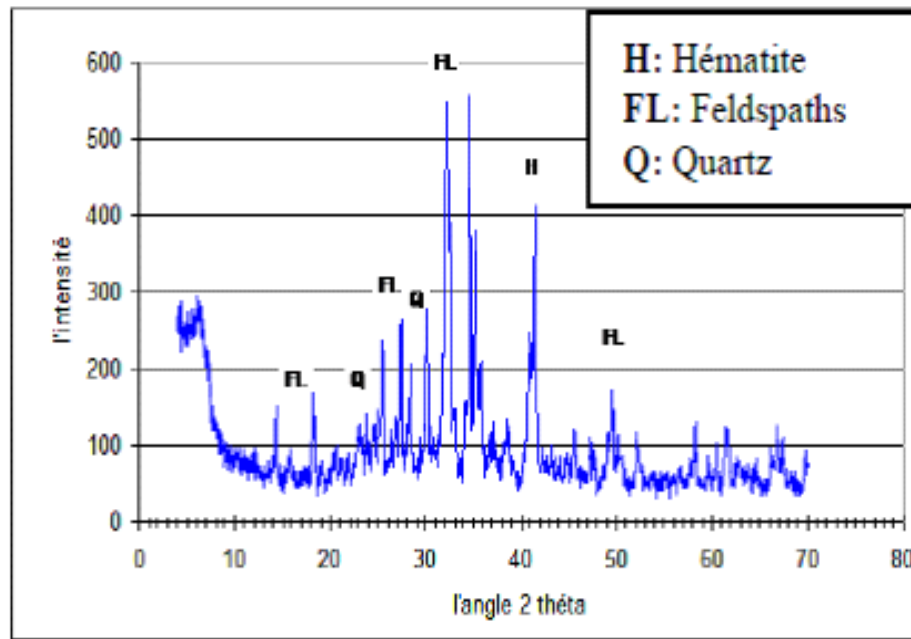


Figure 2.10 : Analyse chimique par DRX de la pouzzolanne de Beni Saf.

### 2.2.3. Granulats

#### 2.2.3.1. 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 2.6 et leurs courbes granulométriques, sont présentées sur la figure 2.15. Les figures 2.11 et 2.12 donnent un aperçu sur la nature des sables utilisés.

#### 2.2.3.2. Gravier

Le gravier utilisé est un gravier concassé à deux classes granulaires (3/8 & 8/15) (Fig. 2.13 et 2.14) provenant de la carrière de Mont Guorno de la région de Berrouaghia (Médéa) dont les propriétés physiques et mécaniques sont présentées au tableau 2.7 et leurs courbes granulométriques sont présentées dans la figure 2.15.



Figure 2.11 : Sable fin de Hassi Bahbah.



Figure 2.12 : Sable grossier de Mont Guorno.



Figure 2.13 : Gravier de Mont Guorno 3/8.



Figure 2.14 : Gravier de Mont Guorno 8/15.

#### 2.2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la fabrication de nos bétons est celle de distribution générale considérée comme potable, exempte de toutes impuretés nuisibles au béton et conforme à la norme NF EN 1008 [283].

Tableau 2.6 : 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 [278]
Module de finesse	1,06	3,45	
Masse volumique absolue ( $\text{g/cm}^3$ )	2,59	2,63	NF EN 1097-6 [279]
Masse volumique apparente ( $\text{g/cm}^3$ )	1,42	1,53	NF EN 1097-3 [280]
Equivalent de sable (%)	61,13	41,31	NF EN 933-8 [281]
Taux d'absorption d'eau (%)	0,04	0,38	NF EN 1097-6 [279]

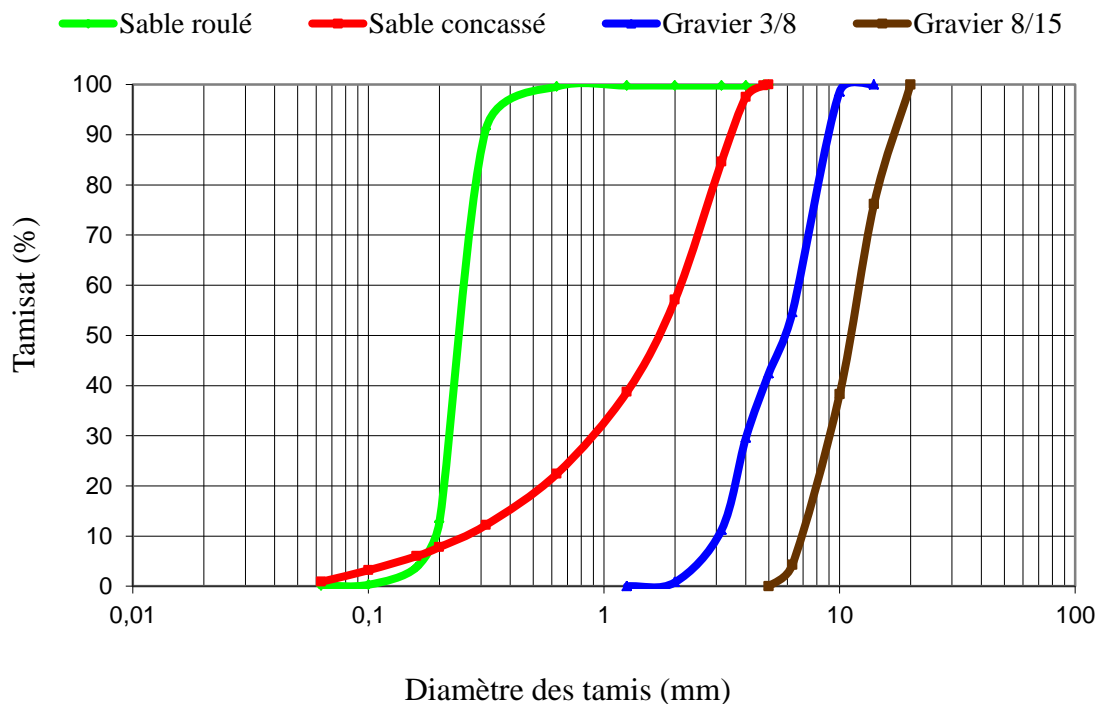


Figure 2.15 : Courbes granulométriques des granulats utilisés.

Tableau 2.7 : Propriétés physico-mécaniques des graviers utilisés

Caractéristiques	Fraction 3/8	Fraction 8/15	Normes
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,67	NF EN 1097-6 [279]
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,37	1,34	NF EN 1097-3 [280]
Taux d'absorption d'eau (%)	0,19	0,52	NF EN 1097-6 [279]
Résistance aux chocs (Los-Angeles)	27,92	24,60	NF EN 1097-2 [282]

### 2.2.5. Adjuvant

Le superplastifiant utilisé dans cette étude est un haut réducteur d'eau de la troisième génération issu de la famille des polycarboxylates est formulé à base de polymère de synthèse combinée. Il est produit par la société GRANITEX et commercialisé sous le nom « MEDAFLOW 145 ». Il ne présente pas d'effet retardataire (voir fiche technique en annexe A) et est particulièrement adapté aux applications autoplaçantes. Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,3 à 2 % du poids de la poudre dans le mélange et ses principales propriétés sont résumées comme suit :

- Forme :..... Liquide ;
- Couleur :..... Brai clair ;
- Extrait sec :..... 30 % ± 1.5 ;
- Densité : ..... 1,065 ± 0.015 ;
- PH :..... 5 – 6 ;
- Teneur en chlorure :..... < 1g/l.

### 2.3. Formulation des bétons autoplaçants

La formulation du béton est une étape très importante dans le but d'obtenir un béton ouvrable, résistant et durable. 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 au 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 bétons autoplaçants (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 et Jin [284], des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP à 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.

### 2.3.1. Formulation du mortier autoplaçant

Afin de déterminer les quantités des matériaux : ciment, granulats, eau et adjuvant, nous nous sommes basés sur la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par Okamura [2], avec quelques modifications apportées au niveau de la détermination de la teneur en sable dans le mortier (S/M), le rapport eau/ciment (E/C) ainsi que le rapport superplastifiant/ciment (Sp/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 (voir annexe B).

#### 2.3.1.1. Rapport Sable / Mortier (S/M)

Les auteurs de la méthode générale ont limité le volume du sable à 40% de celui du mortier (Sable/Mortier = 0,4) pour obtenir un meilleur MAP à base de matériaux locaux japonais [2]. 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 [5]. Domone [34] 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, plusieurs recherches ont été effectuées sur le béton autoplaçant à base des matériaux Algériens. En effet la plupart de ces travaux ont montré qu'un rapport S/M égal à 0,5 est adéquat pour obtenir un bon BAP [285-287].

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 [5] et le rapport S/M a été fixé à 0,5.

### 2.3.1.2. Ajustement des rapports eau/ciment (E/C) et superplastifiant/ciment (S<sub>p</sub>/C)

En général, les BAP sont caractérisés par un faible rapport eau/ciment ( $E/C < 0,5$ ) [79], et ce pour limiter la quantité d'eau libre et améliorer par conséquent leur résistance à la ségrégation. Certains auteurs [41] ont trouvé que des rapports E/C 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 [41]. Boukendakdji [5] a rapporté qu'il faut aller jusqu'à un rapport E/C égale à 0,4 pour obtenir un MAP satisfaisant ayant un étalement supérieur à 27 cm.

Le rapport E/C 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/C et un volume de pâte élevé, ce qui contribue à l'amélioration de leurs résistances et durabilités.

La sélection du rapport E/C et du rapport S<sub>p</sub>/C est ajustée par l'essai d'étalement au mini cône, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre 270 et 330 mm, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre 2 et 10 sec [50]. Ces rapports sont déterminés comme suit : pour chaque rapport E/C, on fait varier le dosage en superplastifiant de 0,3 à 2%. Les rapports optimaux E/C et S<sub>p</sub>/C sont ceux qui peuvent donner simultanément un bon MAP. Il faut noter ici que le mélange de mortier ne comportera aucune addition minérale.

### 2.3.2. 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 (voir annexe C). 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/C et  $S_p/C$ . Pour accepter ces rapports, le mélange obtenu doit avoir un étalement variant entre 65 et 80 cm [285], 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/C (eau/ciment), S/M (sable/mortier) ainsi que  $S_p/C$  (superplastifiant/ciment).

### 2.3.3. Formulation des BAP à base d'addition minérale

Dans cette recherche on a étudié l'effet de type d'addition minérales sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants muris sous différentes températures, 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 garder fixes. Le choix de ces deux paramètres est basé sur les résultats trouvés à travers plusieurs recherches dans notre pays et qui sont basés sur l'effet des mêmes additions minérales et provient des mêmes carrières [5, 178, 198, 288].

Des études ultérieures [172] ont montré que le laitier algérien possède une activité moyenne et que le taux de substitution du ciment par ce laitier est de 15 à 20% sans dépasser un maximum de 30%. En outre, Boukendakdji et al. [285] ont rapporté que la substitution de 15% du ciment par du laitier granulé d'El Hadjar avec une finesse de  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ , peut donner un bon béton autoplaçant sans ressuage ni ségrégation en augmentant la fluidité, réduisant le besoin en superplastifiant ( $S_p$ ) et avec des résistances comparables à celles du béton de référence au-delà de 28 jours d'âge.

Dans l'étude de l'effet des additions minérales sur le comportement rhéologique du béton autoplaçant, les résultats trouvés par Allali [202], Belaidi et al. [289] sur l'effet de la pouzzolane de Beni Saf et Kouider Djelloul [290] sur le laitier granulé d'El Hadjar, ont montré tout qu'un taux de remplacement de 15% s'avère un optimum pour avoir un bon comportement rhéologique du BAP.

Hammat [180] a étudié également l'effet de la pouzzolane de Beni Saf et le laitier d'El Hadjar sur les différentes propriétés d'un mortier autoplaçant. Elle a varié la finesse (3500, 4200 et 5000 cm<sup>2</sup>/g) et le taux de substitution (0 à 50%) de ces deux additions. Elle a conclu que la finesse et le taux ne doivent pas dépasser 5000 cm<sup>2</sup>/g et 30% respectivement, et qu'un taux de 15% d'additions (pouzzolane ou laitier) et finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g ont donné de bon résultat sur les essais d'ouvrabilité, résistance et retrait du mortier autoplaçant.

En ce qui concerne l'effet du calcaire comme addition, Bensebti [288] a montré que le taux de 17% a mené à une augmentation de résistance de 35% par rapport à un taux de 33% de calcaire. Itim et al. [291] ont aussi prouvé qu'une substitution du ciment à moins de 15% de poudre de calcaire semble être bénéfique et présente des résistances à la compression similaires à celles du ciment ordinaire à l'âge de 28 jours.

Dans notre étude et suite aux résultats mentionnés précédemment, on a utilisé des additions broyées à une finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g avec un taux de substitution fixé à 15% pour toutes les additions. Il est à noter aussi que ce pourcentage et s'agit du taux moyen d'ajouts utilisé dans la plupart des cimenteries Algériennes. En effet, quatre (04) mélanges ont été préparés en substituant une partie de ciment avec l'une des additions minérales employées à savoir : le calcaire, le laitier et la pouzzolane naturelle avec un taux de substitution de ciment de 15%. Les différents mélanges préparés ainsi leurs nomenclatures sont les suivants :

- **BAPT** : béton autoplaçant de référence sans additions minérales ;
- **BAPC** : béton autoplaçant avec 15% de calcaire ;
- **BAPL** : béton autoplaçant avec 15% de laitier ;
- **BAPP** : béton autoplaçant avec 15% de pouzzolane.

#### 2.4. Confection et conservation des éprouvettes

Après avoir déterminé les quantités du ciment, sable, gravier (3/8 et 8/15), eau et superplastifiant (voir Annexe C) pour chaque BAP, la préparation des mélanges a été confectionnée dans un malaxeur de laboratoire d'une capacité de 40 litres. La procédure de malaxage adoptée est celle proposée par Domone et Jin [284].

### 2.4.1. Procédure de malaxage

La différence majeure entre la composition du BAP et celle du béton courant est la présence du superplastifiant dans le premier. Cette dernière est cependant liée principalement au temps d'addition du superplastifiant durant le processus du malaxage, c'est-à-dire au début ou au cours de ce processus, et à la durée de malaxage du mélange. Domone et jin [284] ont montré que le temps optimum d'addition 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. Il est souvent motionné sur les fiches techniques des additions chimique (superplastifiant) et prouvé par Boukendakdji [5] que l'efficacité du superplastifiant, est d'autant plus grande lorsqu'il est ajouté avec 40% de l'eau après l'humidification du béton par 60% 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 [292, 293] ont proposé des durées de malaxage variant entre 3 et 4 min. Pedersen et Smelpass [294] ont rapporté qu'une durée de malaxage excédant 5 min est préférée. On se basant sur ces recommandations et sur les travaux cités par d'autres chercheurs [5, 254], deux procédures de malaxage sont adoptées : un pour le mortier et l'autre pour le béton.

#### 2.4.1.1. Cas de mortier

Après avoir calculé la quantité de chaque élément entrant dans la composition du MAP (voir exemple de calcul dans l'annexe B), on procède à un malaxage sec de la poudre et du sable pendant 15 secondes pour homogénéiser le mélange, on ajout ensuite 60% 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 mélangé). Le malaxage est continu pendant 3 autres minutes. Le tableau 2.8 résume toutes ces étapes.

Tableau 2.8 : Séquence de malaxage du mortier autoplaçant [284]

Opération	Introduire (ciment, sable et addition)	Verser 70% E	Verser 30% E + Sp	Malaxage		
				1 min	2 min	1 min
Durée	1 min	1 min	1 min	1 min	2 min	1 min
Malaxage	Vitesse lente		Vitesse rapide		Arrêt	Vitesse rapide

#### 2.4.1.2. Cas de béton

Un exemple de calcul des quantités des constituants du BAP est donné dans l'annexe C. Une fois que toutes les quantités seront calculées et pesées, on procède à un malaxage sec de la poudre, du sable et des gravillons pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange. Puis on ajoute 60% 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 mélangé). Le malaxage est continu pendant 5 autres minutes. Le malaxage est arrêté ensuite pendant 2 minutes, puis recommencé durant 30 secondes avant le déchargement. Dans le tableau 2.9 sont récapitulées toutes les étapes de malaxage des BAP.

Tableau 2.9 : Séquence de malaxage du béton autoplaçant [284]

Opération	Introduire (ciment, sable, gravier et addition)	Verser 70% E	Verser 30% E + Sp	Malaxage		
				5 min	2 min	1 min
Durée	1 min	1 min	1 min	5 min	2 min	1 min
Malaxeur	En marche				Arrêt	En marche

#### 2.4.2. Confection et conservation des éprouvettes

La confection des éprouvettes dans les différents moules destinés aux essais à l'état durci est réalisée sans vibration ni compactage. Les moules ont été conservés 24 heures à une température ambiante après leur coulage. Les différentes formes d'échantillons moulées pour les essais programmés sur BAP à l'état durci sont les suivantes :

- Cubiques 10x10x10 cm : pour la résistance mécanique à la compression, vitesse ultrasonique et porosité totale.

- Prismatiques 7x7x28 cm : pour la résistance à la traction et essais d'absorption capillaire.
- Cylindriques 16x32 cm : pour l'essai du module d'élasticité.

Dans le but d'étudier l'effet de la température de cure sur les propriétés des bétons autoplaçants à base des additions minérales, une fois le démoulage effectué, les échantillons pour chaque mélange sont divisés en quatre (04) groupes, chaque groupe d'éprouvettes est subit l'un des modes de cure suivants :

- Dans l'eau, A  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'au jour d'essais
- Dans l'eau, 7 jours à  $40 \pm 2^\circ\text{C}$  puis à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'au jour d'essais
- Dans l'eau, 7 jours à  $60 \pm 2^\circ\text{C}$  puis à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'au jour d'essais
- Dans l'eau, 7 jours à  $80 \pm 2^\circ\text{C}$  puis à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'au jour d'essais

Dans le cas des éprouvettes de référence en mode de cure normal, les échantillons ont été conservés dans l'eau à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'à l'âge d'essais. Pour les éprouvettes soumis au traitement thermique, chaque groupe d'échantillons a été maintenu dans de l'eau chauffée pendant 7 jours et ensuite le durcissement a été poursuivi dans de l'eau à température normale ( $20^\circ\text{C}$ ) jusqu'à l'âge d'essai.

Trois différentes températures de cure ont été utilisées dans cette étude 40, 60 et  $80^\circ\text{C}$ . Pour le choix de la température maximale de  $80^\circ\text{C}$ , c'est celle appliquée dans le domaine de préfabrication du béton en Algérie [63, 230]. En ce qui concerne le choix de la durée de cure à température élevée de 7 jours, on a basé sur les résultats de d'autres chercheurs qui ont prouvé qu'une durée de cure initiale à l'eau de 7 jours est la plus bénéfique pour le développement de bonnes résistances à la compression par rapport à 3 ; 14 ou 28 jours [231, 295, 296].

Kim et al. [254] ont trouvé que la variation de la température au-delà de 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 [297].

Un traitement durant 7 jours dans l'eau, entraîne une augmentation de l'indice de continuité  $I_c$ . Cette amélioration est de l'ordre de 1, 5 et 8% pour les dosages 150, 200 et 250  $\text{kg/m}^3$  dans le cas de fillers de briques, et 5 et 10% pour le cas de fillers calcaires. Bendjillali [298] a prouvé aussi que sept (07) 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% et l'effet de 7 jours de protection par le produit de cure est plus important à l'air libre.

Il a été prouvé aussi par les travaux d'Ezziane [299] sur l'effet de la durée de cure à une température élevée sur la résistance en compression des mortiers à la pouzzolane, et Salhi et al. [296] sur l'effet de la période initiale de cure à l'eau sur les propriétés et le comportement de béton autoplçant, que la meilleure période initiale de cure à l'eau pour avoir des bonnes résistances mécaniques à 28 jours est de sept (07) jours.

## 2.5. Procédures expérimentales

### 2.5.1. Essais effectués sur mortier frais

Les essais sur mortier frais ont pour but en premier temps de fixer les deux rapports  $E/C$  et  $S_p/C$ . 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 mesurant le temps d'écoulement à travers l'essai au mini-entonnoir en V.

En deuxième étape et pour savoir l'effet des additions minérales sur les caractéristiques rhéologiques (viscosité plastique et seuil de cisaillement) ainsi le dégagement de chaleur des différents mélanges étudiés, l'essai au rhéomètre et l'essai au calorimètre sont réalisés sur mortier autoplçant sans et avec additions minérales. Pour cela et une fois fixés les rapports  $E/C$  et  $S_p/C$ , quatre (04) mortiers autoplçants sont fabriqués. Un mélange témoin sans addition MAPT et trois (03) mélanges, dans chacun 15% du poids de ciment est remplacé par l'une des additions minérales. Un mélange avec 15% de calcaire MAPC, un mélange avec 15% de laitier MAPL et un mélange avec 15% de pouzzolane MAPP.



### 2.5.1.1. 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 2.16 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

D'après les résultats des expériences réalisées sur des matériaux japonais par Nawa et al. [300], l'étalement doit être compris entre 250 et 280 mm. Quant à Chai [301], qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm. Un autre intervalle a été proposé par Domone entre 270 et 330 mm [284].



Figure 2.16 : Essai d'Etalement pour Mortier.

### 2.5.1.2. 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 calculé 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 (Fig. 2.17).

Nawa et al. [300], ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10s produisent un MAP réussi. Quand à Chai, qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 s [301].

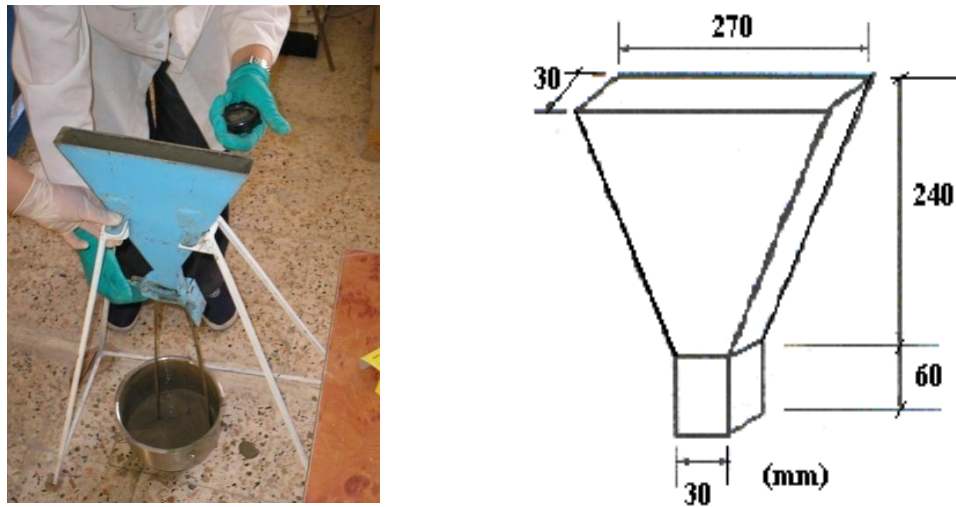


Figure 2.17 : Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier.

### 2.5.1.3. Essai au rhéomètre

Pour déterminer, expérimentalement, le comportement rhéologique des mortiers avec et sans additions minérales, on a utilisé un rhéomètre rotatif de type Couette (Fig. 2.18) développé à l'Université de Cergy Pontoise [302, 303]. Ce type est généralement considéré comme étant le mieux adapté pour des suspensions concentrées possédant un seuil de cisaillement [304]. Il est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation (Fig. 2.18.a), un croisillon composé de deux plaques perpendiculaires de dimensions 5x10 cm (Fig. 2.18.b) et d'un récipient cylindrique de dimension 10x13 cm (Fig. 2.18.c).

Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, une pale dans un échantillon cylindrique de mortier frais et de mesurer le couple appliqué. On a fabriqué quatre (04) mélanges en mortier autoplaçant, un témoin avec 100% de ciment et trois (03) autres dont 15% du poids de ciment a été remplacé par l'une des additions minérales employées dans cette étude à savoir le calcaire, le laitier granulé et la pouzzolane naturelle. Cet essai a été réalisé au laboratoire de Mécanique et Matériaux de Génie Civil, à l'Université Cergy-Pontoise (France).

Après la mesure de l'étalement et le temps d'écoulement, on verse le mortier préparé dans le récipient qui sera fixé pour éviter tout mouvement. Ensuite, on fait descendre le croisillon au centre du récipient qui pénètre au centre du mortier. Il faut s'assurer que

l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du mortier. A l'aide du logiciel de l'essai rhéométrique, on démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié. A partir de la courbe qui représente les contraintes de cisaillement en fonction des taux de cisaillement, on peut déterminer le comportement rhéologique de chaque mortier (seuil de cisaillement et viscosité plastique) conformément au détail de calcul donné en annexe D.

Le profil de vitesse utilisé, est ceux proposé par Soualhi et al. [303] et qui est choisi sur la base d'une série d'essai qui consiste à trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation. La figure 2.19 illustre le profil de vitesse utilisé pour le déroulement des essais.

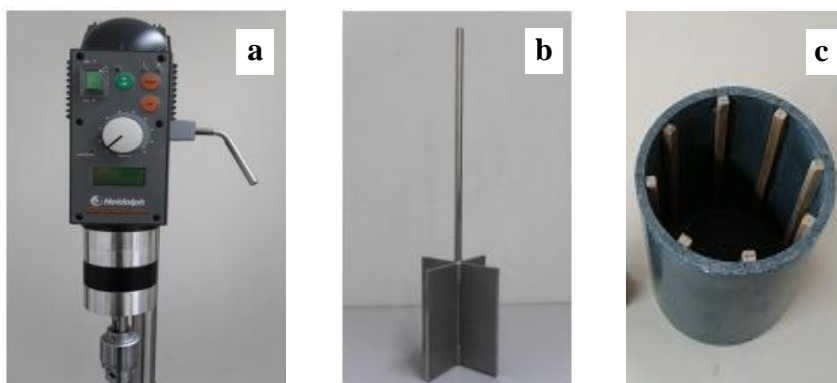


Figure 2.18 : Dispositif du rhéomètre utilisé (a/ agitateur ; b/ croisillon ; c/ récipient).

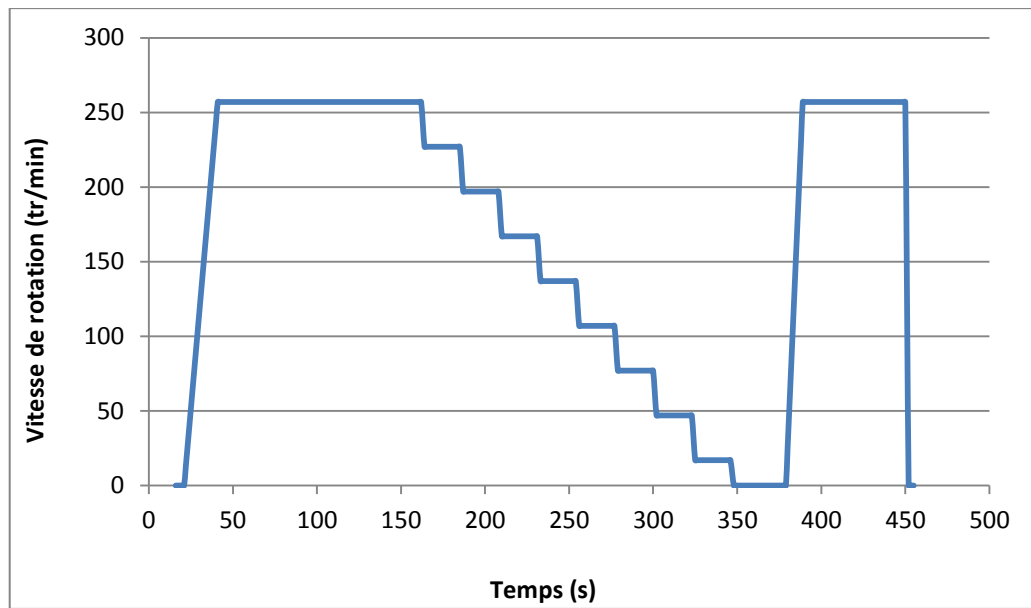


Figure 2.19 : Profil de vitesse utilisé pour l'essai rhéométrique [303].

#### 2.5.1.4. Essai de la chaleur d'hydratation

L'hydratation d'un matériau cimentaire est un processus exothermique. Les réactions du ciment Portland en présence d'eau ou « hydratation » s'accompagnent d'un dégagement de chaleur dont la grandeur dépend de la composition du ciment. La dynamique des réactions d'hydratation va dépendre de nombreux facteurs tels que la finesse de mouture, la composition et l'ajout d'éléments secondaires.

La cinétique d'hydratation peut être quantifiée au moyen d'une mesure de la chaleur dégagée par le matériau au cours de sa cure. Donc, le dégagement de chaleur et ainsi l'évolution de l'hydratation pourront être suivis dans le temps pour comprendre les réactions qui se passent lors de l'hydratation du ciment, et faire un lien avec sa prise et le développement des résistances.

Dans notre étude nous avons utilisé la méthode de la calorimétrie semi-adiabatique appelée aussi « quasi-adiabatique » (Q.A.B), en se référant à la norme NF EN 196-9 [305]. L'essai a pour but la mesure continue de la chaleur d'hydratation du ciment au cours des premiers jours. On a fabriqué quatre (04) mélanges en mortier autoplaçant, un témoin avec 100% de ciment et trois (03) autres dont 15% du poids de ciment a été substitué par le calcaire, le laitier granulé et la pouzzolane naturelle. Cet essai a été réalisé au laboratoire de Mécanique et Matériaux de Génie Civil, à l'Université Cergy-Pontoise (France) (Fig. 2.20).

Le principe de l'essai par calorimétrie semi-adiabatique, dit méthode de *Langavant*, consiste à introduire un échantillon encore frais dans un calorimètre afin de déterminer d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. A une échéance donnée, la chaleur d'hydratation dégagée par l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

La chaleur d'hydratation, notée  $Q$  et exprimée en joules par gramme de liant, est définie au moyen de l'équation 2.3. Le premier terme représente la chaleur accumulée dans le calorimètre et le second la chaleur dissipée vers le milieu ambiant. Le calcul de  $Q$  se fait généralement par discrétisation suivant l'équation 2.4.

$$Q = \frac{c}{m_l} \theta_t + \frac{1}{m_l} \int_0^t \alpha \cdot \theta_t \cdot dt \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{c}{m_l} \theta_i + \frac{1}{m_l} \sum_{i=0}^{i=n} \alpha_i \cdot \bar{\theta}_i \cdot \Delta t_i \quad (2.4)$$

Avec :

$C$  : la capacité thermique totale du calorimètre [ $J \cdot ^\circ K^{-1}$ ] (Eq. 2.5);

$M_L$  : la masse de liant contenu dans l'échantillon [g];

$t$  : le temps et  $\Delta t_i$  un intervalle de temps [h] ;

$\theta_i$  : la différence de température entre le calorimètre d'essai et celui de référence à un temps  $t_i$  [ $^\circ K$ ];

$\alpha$  : le coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre [ $J \cdot h^{-1} \cdot K^{-1}$ ] et  $\alpha_i$  la valeur moyenne du coefficient de déperdition thermique du calorimètre [ $J \cdot h^{-1} \cdot K^{-1}$ ] sur la période  $\Delta t_i$

$$C = 0,8 (m_l + m_s) + 3,8 m_w + 0,5 m_b + \mu \quad (2.5)$$

Avec :

$m_l$ ,  $m_s$ ,  $m_w$  et  $m_b$  sont respectivement les masses du liant, des granulats, de l'eau et de la boîte contenant l'échantillon [g].

$\mu$  est la capacité thermique du calorimètre vide, en joules par kelvin [ $J \cdot ^\circ K^{-1}$ ];

Les coefficients 0,8 ; 3,8 et 0,5 [J.g<sup>-1</sup>.°K<sup>-1</sup>] correspondent aux chaleurs massiques respectives des phases solides, de l'eau et de la boîte à mortier. Ils sont considérés, dans la norme NF EN 196-9 [305] comme constants au cours de l'essai.



Figure 2.20 : Essai calorimétrique pour mesurer la chaleur d'hydratation.

### 2.5.2. Essais effectués sur Béton frais

Avant d'accepter une composition comme étant celle d'un béton autoplaçant, il faut s'assurer que les propriétés du béton à l'état frais obéissent à certains critères établis selon les recommandations de l'AFGC 08 [7] et les normes en vigueur. 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 (capacité au passage, capacité au remplissage et homogénéité). Ils sont destinés à caractériser le béton avec les termes qualitatifs de fluidité, stabilité et absence de blocage. Pour la caractérisation et la vérification de nos bétons autoplaçants, nous présentons dans cette partie les principaux tests d'ouvrabilité recommandés par l'AFGC [7] et la norme NF EN 206-9 [306].

### 2.5.2.1. Essai d'étalement (Flow test - NF EN 12350-8)

L'essai d'étalement est utilisé pour évaluer la déformabilité du BAP en milieu non confiné pour évaluer la capacité au remplissage à l'état libre en l'absence d'obstacles. Le test nécessite un cône d'Abrams (celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement) et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 500 mm (Fig. 2.21) [307].

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. Le temps mis par le béton pour atteindre un diamètre de 500 mm ( $t_{500}$ ) est d'abord mesuré ; il renseigne sur la vitesse de mobilité du béton. Ce temps d'écoulement  $t_{500}$ , peut donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange [13]. Une faible valeur du temps d'écoulement  $t_{500}$ , indique une grande déformabilité, L'EFNARC [12] recommande des valeurs de  $t_{500}$  bornées par 2 et 5s.

A l'arrêt de l'écoulement, On mesure la taille de la galette du béton obtenue dans les deux directions perpendiculaires (Fig. 2.21). L'étalement final correspond à la moyenne des deux diamètres mesurés et renseigne sur la déformabilité du béton. 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 [7]. 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 [12].



Figure 2.21 : Mesure du diamètre d'étalement.



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.

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). Cette information est très importante pour estimer la durée pratique d'utilisation du BAP.

#### 2.5.2.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test)

L'essai de l'entonnoir mis en place par Okamura et Ozawa [308] 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 une 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 la première lumière par l'orifice.

Comme l'essai de la capacité au remplissage, l'essai de l'entonnoir en V (Fig. 2.22) nous renseigne sur la stabilité, c'est-à-dire s'il existe 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 [13].

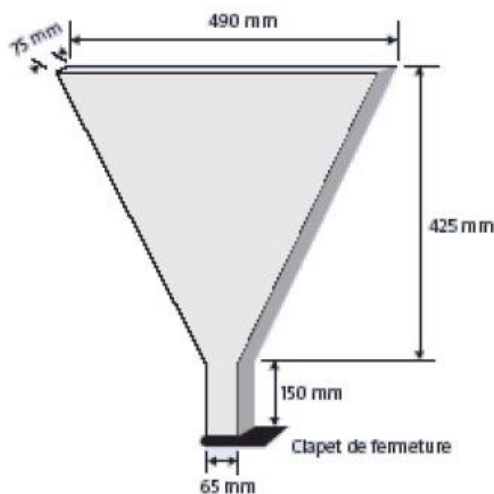


Figure 2.22 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).



Selon EFNARC [12], 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.

### 2.5.2.3. Essai à la boîte en L (L-Box test - NF EN 12350-10)

Avec l'essai à la boîte en L, il est possible de tester la capacité au remplissage et la capacité au passage du béton autoplaçant. Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en L. Pour réaliser l'essai, on place le béton dans la partie vertical de la boîte « tour » de l'appareil (hauteur de 600 mm), soit environ 12,7 l de béton. Les recommandations préconisent d'attendre une (01) minute avant d'ouvrir la trappe pour voir s'il y a de la ségrégation. Ensuite on retire la trappe et on mesure les paramètres suivants (Fig. 2.23) [309] :

- Le temps d'écoulement du béton  $t_{20}$  pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale).
- Le temps d'écoulement du béton  $t_{40}$  pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale).
- Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$ .

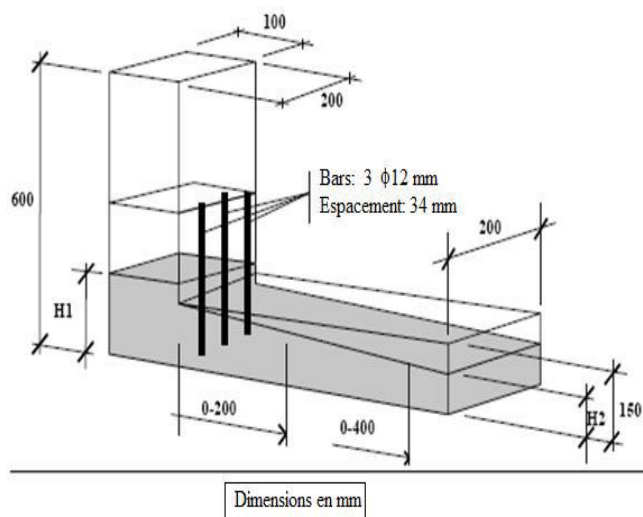


Figure 2.23 : Essai de la boîte en L.

On peut alors calculer le rapport  $H_2/H_1$ , c'est un indicateur de la capacité de passage. Lors de cet essai, il est recommandé d'avoir un taux de remplissage supérieur à 80% [2]. Pour une bonne capacité au passage, une valeur du rapport entre 0,8 et 0,85 est acceptable. La capacité au passage et la résistance à la ségrégation, peuvent être détectées visuellement, si on observe un résidu de granulats dans la partie verticale du L-Box (avant les barres de ferrailage), 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 sec pour  $t_{20}$  et inférieures à 3,5 secs pour  $t_{40}$  afin de rester dans le domaine autoplaçant [14].

Ce test permet aussi de caractériser la viscosité du mélange. De plus, la présence des barres simulant des armatures d'un coffrage renseigne sur la capacité de remplissage du mélange. Dans cette étude, nous avons utilisé une boîte en L avec trois (03) barres. Ce cas correspond à des ouvrages d'usage courants comme les bâtiments. Lorsque le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$ .

#### 2.5.2.4. Essai de ségrégation dynamique au tamis (NF EN 12350-11)

Les capacités au remplissage et au passage sont primordiales pour l'aspect autoplaçant du béton, il faut également que le béton soit suffisamment homogène et stable une fois mis en place pour que ses propriétés à l'état durci soient conformes aux attentes. A travers cet essai, on peut quantifier le pourcentage en poids de laitance qui caractérise le risque de ségrégation. L'essai nécessite un seau de 10 litres avec un couvercle, un tamis de maille 5 mm, de diamètre 315 mm et un fond (Fig. 2.24) [310].

Pour la réalisation de cet essai il faut verser 10 litres de BAP immédiatement en fin du malaxage dans un seau et le couvrir pour le protéger de la dessiccation pendant 15 minutes. Après 15 minutes, il faut verser  $4,8 \pm 0,2$  kg de béton sur le tamis de 5 mm à une hauteur de chute de 50 cm et laisse en deux minutes, avant de peser la masse de la laitance traversant le tamis (Fig. 2.24). Le but est de déterminer la quantité de laitance dans le fond. Le pourcentage de laitance qui est passé à travers le tamis est calculé selon l'expression de l'équation 2.6 suivante.



Figure 2.24 : Essai de stabilité dynamique au tamis.

$$P = \frac{\text{Masse de laitance}}{\text{Masse de l'échantillon}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Des valeurs de l'indice de ségrégation variant entre 5 et 15% est le signe d'une résistance satisfaisante à la ségrégation. Inférieur à 5%, la résistance est considérée excessive, ce qui affecte la qualité des parements (mauvaise qualité des parements), entre 15 et 30%, la résistance est considérée critique. Au-delà de 30%, la résistance est mauvaise [12].

#### 2.5.2.5. Masse volumique

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 vibration (Fig. 2.25).

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 2.7 [311].

$$\rho_b = \frac{M - M_0}{V} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (2.7)$$

Où  $\rho_b$  : 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  $M_{Vth}$  calculée à partir de la formulation théorique du béton avec comme source d'incertitude la quantité d'air occlus.



Figure 2.25 : Mesure de la masse volumique du béton frais.

### 2.5.3. Caractéristiques mécaniques

Les températures élevées lors de la maturation, ainsi que l'emploi des additions minérales dans la fabrication des BAP peuvent avoir des effets sur les propriétés mécaniques et la durabilité de ces derniers. Il est nécessaire de quantifier ces effets en mesurant un certain nombre de propriétés du béton à l'état durci. Ces propriétés et leurs conditions de mesure sont maintenant explicitées.

#### 2.5.3.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression est déterminée conformément à la norme en vigueur [312] sur des éprouvettes cubiques  $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$ , à l'âge de 3 ; 7 ; 28 et 90 jours. La charge est appliquée sur les éprouvettes par une presse hydraulique de capacité de 2000 kN (Fig. 2.26).

L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture. La vitesse de chargement est égale à 0,5 MPa/s. Pour chaque échéance (3 ; 7 ; 28 et 90 jours) et pour chaque gâchée, la résistance en compression calculée correspond à la moyenne des résistances obtenues sur 3 éprouvettes.



Figure 2.26 : Machine d'essai de compression

### 2.5.3.2. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction est une caractéristique essentielle d'un béton puisqu'elle traduit sa résistance à la fissuration. L'essai utilisé dans cette étude est celui de la traction par flexion (3 points). Il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique, reposant sur deux appuis à une charge croissante concentrée au milieu jusqu'à la rupture (Fig. 2.27). La charge est appliquée à l'aide d'une presse à lecture digitale reliée à un système d'acquisition par lequel on introduit la vitesse de chargement (50 N/s) suivant la norme en vigueur [313].



Figure 2.27 : Essai de traction par flexion.

La résistance à la traction est obtenue en faisant un simple calcul de résistance des matériaux. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques de  $(7 \times 7 \times 28)$  cm<sup>3</sup> à 3, 7, 28 et 90 jours. L'éprouvette une fois rectifiée, doit être bien disposée sur les appuis de la machine d'essai. 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 :

$$\sigma_t = \frac{M}{I} v \quad (2.8)$$

Avec :

$M$  : Moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge :

$$M = \frac{P.a}{2} \quad (2.9)$$

$$I : \text{Moment d'inertie de la section transversale : } I = \frac{a^4}{12} \quad (2.10)$$

$$v : \text{La distance de la fibre inférieure la plus éloignée : } v = \frac{a}{2} \quad (2.11)$$

La résistance à la traction par flexion est calculée donc par la formule suivante :

$$f_t = \frac{3P}{a^2} \quad (2.12)$$

On affecte un coefficient de 0,6 aux valeurs trouvées pour tenir compte la plastification du béton et on déduit la résistance à la traction ( $f_t$ ) :

$$f_t = \frac{1.8P}{a^2} \quad (2.13)$$

### 2.5.3.3. La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (VU)

La mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques se fait moyennant d'un appareil d'auscultation sonique (ultrason), et conformément à la norme [314]. Cet appareil est constitué d'un générateur d'impulsions électriques, avec deux (02) transducteurs, un émetteur et un récepteur, et d'un dispositif de chronométrage.

L'appareil génère des impulsions électriques traversant l'échantillon du béton à partir d'un transducteur émetteur appliqué sur une surface plane. L'impulsion est captée par un transducteur récepteur également appliqué sur une surface plane en opposition et parallèle à la première. 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 (Fig. 2.28).



Figure 2.28 : Mesure de la vitesse ultrasonique.

Connaissant la distance entre les deux transducteurs, la vitesse ultrasonique est calculée par la formule suivante :

$$V = \frac{L}{t} \quad (2.14)$$

Ou

V: vitesse de propagation des ondes ultrasoniques en m/s ;

L : distance entre les deux transducteurs en m ;

t : temps de propagation des ondes ultrasoniques en s.



#### 2.5.3.4. Module d'élasticité instantané

Le module d'élasticité en compression est déterminé à l'échéance de 28 jours suivant les recommandations [315]. L'essai est conduit sur des éprouvettes cylindriques (16x32cm) que l'on fixe à l'intérieur d'une cage extensométrique à l'aide de vis pointeaux. Un dispositif (cale + couronne) permet de centrer la cage à mi-hauteur par rapport à l'éprouvette de manière à ce que les mesures soient effectuées hors de la zone des cônes de frettage. Cette cage extensométrique est munie d'un capteur de déplacement longitudinal. Une fois mis en place, le dispositif (cage + éprouvette) est positionné entre les plateaux de la presse hydraulique afin d'appliquer le chargement (Fig. 2.29).



Figure 2.29 : Dispositif pour mesure du module d'élasticité sur béton.

Le principe de chargement consiste à effectuer des cycles de charge et décharge jusqu'à 1/3 de la charge de rupture d'une manière continuée, cette valeur ayant été déterminée au préalable à partir des essais de résistance en compression. La vitesse de chargement appliquée est égale à 0,5 MPa/s. Le module est déterminé sur la phase de la dernière montée en charge. Ensuite, cette dernière éprouvette subit un dernier chargement jusqu'à la ruine et fournit la valeur de la résistance en compression.



#### 2.5.4. Essais de caractérisation physique et de durabilité

Des caractéristiques du réseau poreux sont évaluées sur les différents BAP à l'échéance de 28 jours : le volume poreux accessible à l'eau et le volume des pores capillaires par absorption d'eau.

##### 2.5.4.1. Porosité accessible à l'eau

L'essai permet d'évaluer la porosité ouverte, notée P(%), correspond au rapport du volume total des pores ouverts accessibles à l'eau dans un corps poreux à son volume apparent. L'essai consiste à déterminer la masse d'un corps d'éprouve sec (105°C), sa masse lorsqu'il est saturé en eau et son volume apparent par pesée hydrostatique, en suivant les recommandations [316, 317] et la norme en vigueur [318]. Elle s'exprime en pourcentage du volume apparent est déterminée selon l'expression suivante :

$$P (\%) = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (2.15)$$



Figure 2.30 : Dessiccateur pour mettre les éprouvettes sous vide.

Pour réaliser cet essai, et pour chaque béton autoplaçant et chaque température de cure, trois échantillons ont été testés 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, on place les échantillons dans un dessiccateur à vide, sous une dépression de 25 mbar pendant 4 heures (Fig. 2.30), puis on immerge les échantillons dans l'eau, toujours sous vide, pendant 20 heures  $\pm$  1heure. Après quoi les éprouvettes subissent une pesée hydrostatique.

Pour déterminer  $M_{\text{eau}}$  un échantillon est suspendu à l'aide d'un fil du système de suspension de la balance hydrostatique (Fig. 2.31) et il est pesé complètement immergé dans l'eau. La pesée doit être effectuée à 0.001g près.

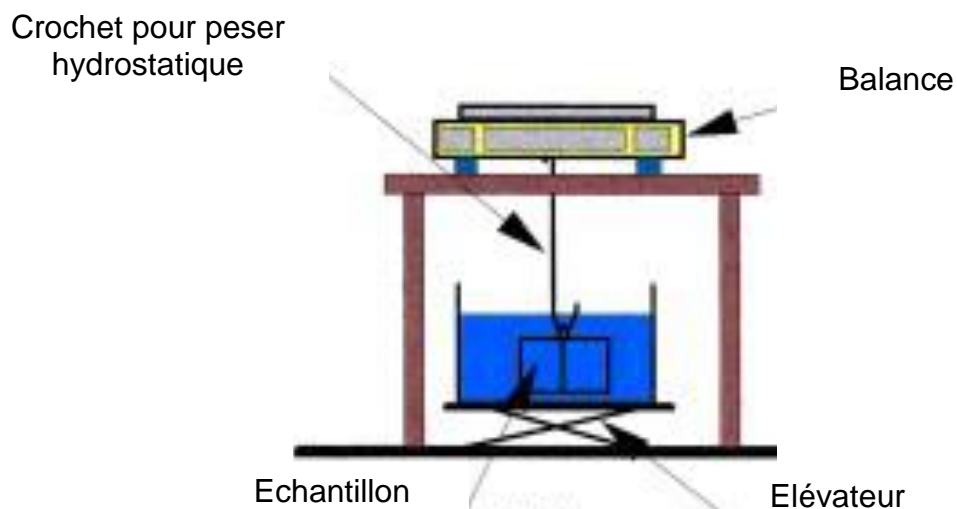


Figure 2.31 : Pesée hydrostatique des échantillons pour l'essai de porosité.

Pour déterminer  $M_{\text{air}}$  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 gouttelettes et du film superficiel d'eau, sans toutefois retirer l'eau des pores et peser immédiatement le corps d'épreuve dans l'air à l'aide d'une balance précise à 0.0 01g près. Il faut s'assurer que l'évaporation de l'eau d'imbibition ne provoque pas de perte de masse appréciable pendant les opérations de pesée. La masse des éprouvettes sèches  $M_{\text{sec}}$ , est obtenue après séchage de l'échantillon en l'exposant à  $40 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

#### 2.5.4.2. 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°C suivant les recommandations en vigueur [316, 317]. Les échantillons testés sont des demi-prismes de surface de 7x7 cm<sup>2</sup> (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 5 mm dans de l'eau (Fig. 2.32). Les échéances de mesure sont les suivantes : ¼, ½, 1, 2, 4 et 24 heures.

Le coefficient d'absorption capillaire  $C_a$  [kg/m<sup>2</sup>] est défini par l'équation 2.16 suivante :

$$C_a = \frac{M_i - M_0}{A} \quad (2.16)$$

Ou :

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

$M_i$  : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg),

$A$  : section de l'éprouvette (m<sup>2</sup>).

La sorptivité  $S$  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  $C_a$ , généralement, entre 1 et 8 heures. La sorptivité est donnée par l'équation 2.17.

$$S = \frac{Ca_8 - Ca_1}{\sqrt{8} - \sqrt{1}} \quad (2.17)$$

Avec :

$S$  : est la sorptivité ( $\text{kg/m}^2/\text{h}^{1/2}$ ),

$Ca_8$  et  $Ca_1$  : sont respectivement les coefficients d'absorption à 8 et 1 heures.

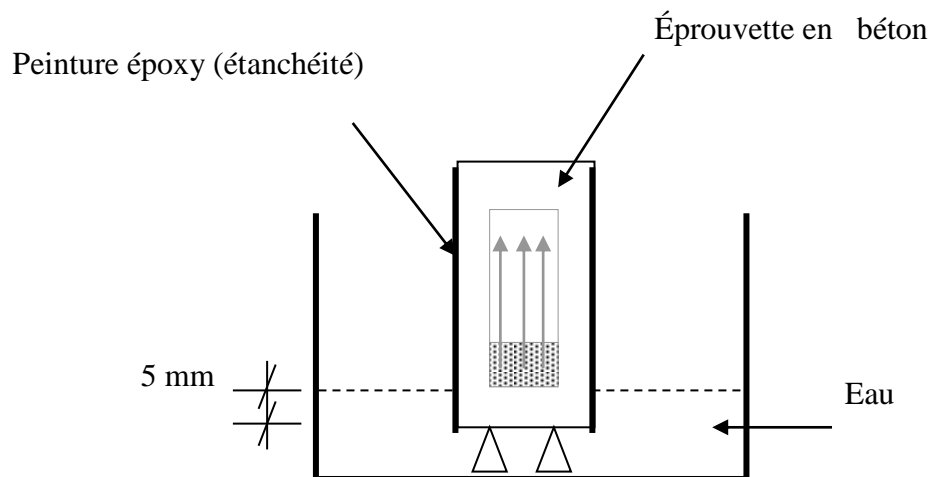


Figure 2.32 : Dispositif expérimental pour mesurer l'absorption d'eau par capillarité.

## 2.6. Synthèse

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 consacrée à cet effet, dans laquelle, nous avons exposé les différents matériaux utilisés pour la formulation des BAP ainsi que leurs propriétés physico-chimiques. Il a été ensuite exposé la méthode de formulation et fabrication, ainsi les séquences de malaxage des différents mélanges de mortiers et bétons autoplaçants utilisés. La formulation adoptée est celle proposée par le Japonais Okamura appelée *Méthode générale* et modifiée de telle manière que les matériaux locaux puissent donner un bon mortier et béton autoplaçant. Pour ce faire, on a procédé donc à quelques essais relatifs au mortier afin de pouvoir fixer les dosages en eau et en superplastifiant. Nous réaliserons également des essais sur les différents BAP à l'état frais afin de pouvoir étudier l'ouvrabilité et l'autoplaçance des différents bétons.

Une série d'essais a été effectuée par la suite sur les bétons autoplaçants durcis pour mettre en évidence l'effet combiné des additions minérales et températures de cure sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton autoplaçant.

L'ensemble des mélanges étudiés ainsi les essais réalisés à l'état frais et durci sur mortiers et bétons autoplaçants sont récapitulés dans les organigrammes présentés par les figures 2.33 et 2.34.

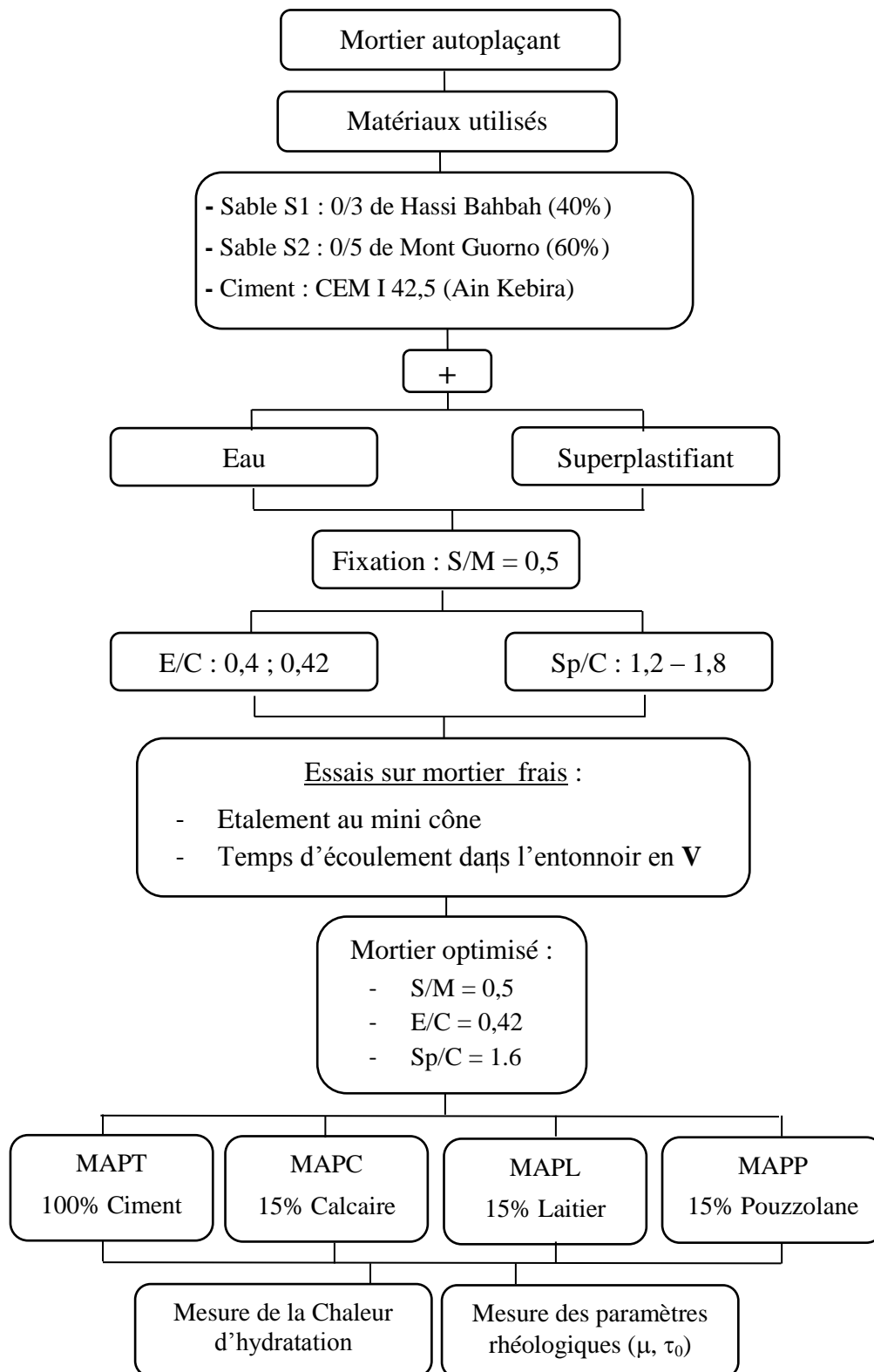
2.6.1. Formulation et essais réalisés sur mortier frais

Figure 2.33 : Variables étudiées et essais réalisés sur mortiers autoplaçants.

2.6.2. Formulation et essais réalisés sur béton autoplaçant

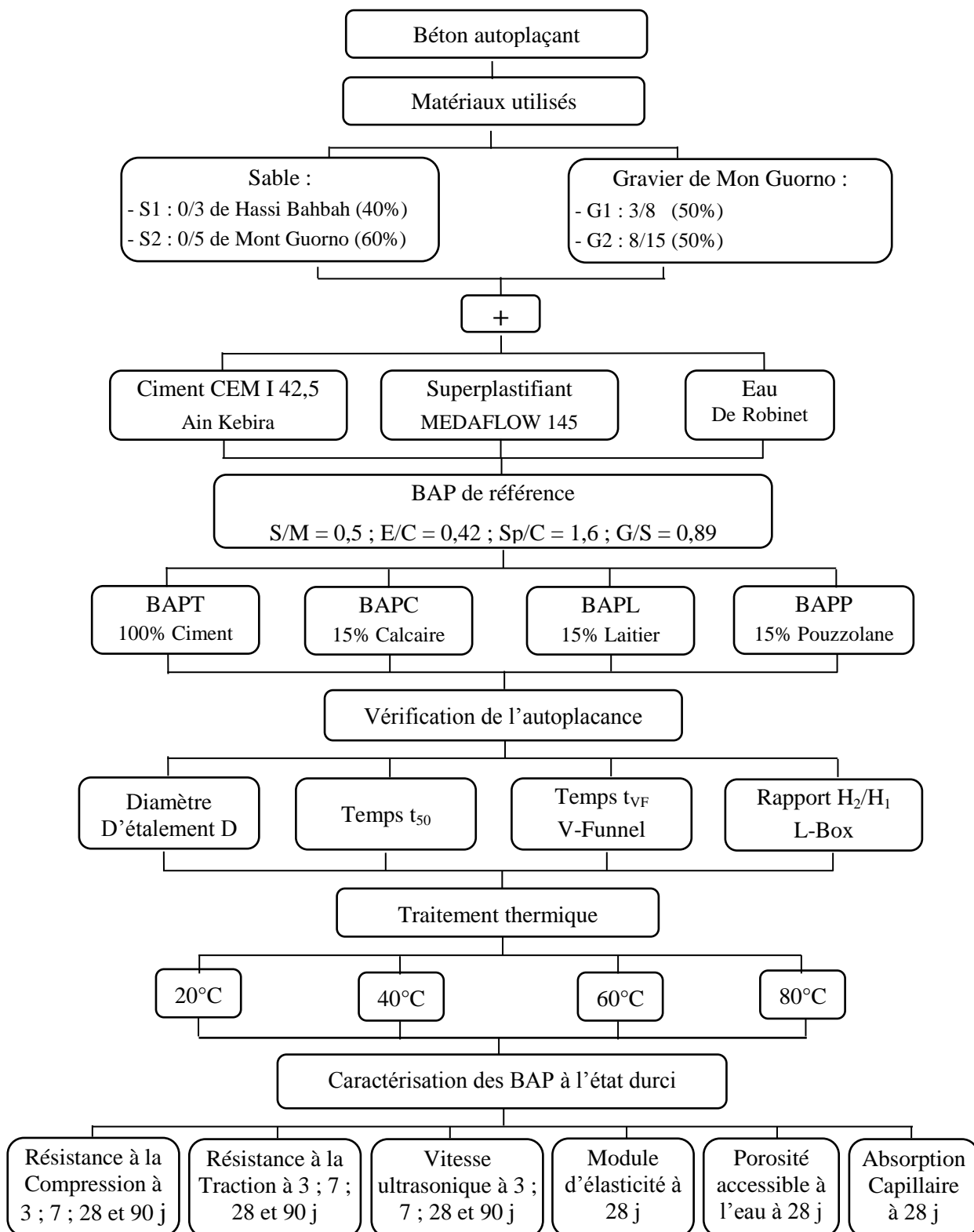


Figure 2.34 : Formulation et caractérisation des BAP à l'état frais et durci.

## **CHAPITRE 3**

### **RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX**

### **ET DISCUSSIONS**



## CHAPITRE 3

### RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSIONS

#### 3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus à partir des différents essais effectués, sur les bétons autoplaçants à l'état frais et durci. Il permet l'étude de la faisabilité autoplaçante des différents BAP réalisés, suite au remplacement du ciment par les additions minérales. Ainsi d'étudier l'influence de ces additions sur les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) des BAP à l'état frais.

Nous présenterons par la suite, l'effet de chaque addition minérale sur le dégagement de chaleur des mortiers autoplaçants issus des différents BAP. Une grande partie de ce chapitre est consacrée sur l'étude et l'analyse de l'effet de la température de cure sur les propriétés mécaniques et celles de durcissement des bétons autoplaçants incorporant des additions minérales et muris sous différentes températures allant de 20 à 80°C.

Nous proposons de compléter cette évaluation en intégrant les résultats présentés dans la synthèse bibliographique (voir chapitre 1) aux résultats obtenus dans notre étude expérimentale. Tous les résultats déterminés expérimentalement, seront aussi comparés avec les prévisions de différents règlements existants ainsi que les modèles reconnus et associés aux différentes caractéristiques étudiées.

#### 3.2. Composition des bétons autoplaçants

Formuler un béton, c'est de trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier de charge donné. Pour un béton autoplaçant c'est complexe vu 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.

3.2.1. Détermination 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 chercher 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 et 330 mm et un temps d'écoulement inférieur à 10 s [284]. Les différentes compositions obtenues pour le mortier autoplaçant 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 3.1 suivant.

Tableau 3.1 : Composition et résultats des essais sur mortier autoplaçant pour différentes valeurs d'E/C et SP/C

Compositions		MAP1	MAP2	MAP3	MAP4	MAP5	MAP6	MAP7	MAP8
S / M		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
E/L		0,40	0,40	0,40	0,40	0,42	0,42	0,42	0,42
Superplastifiant (%)		1,2	1,4	1,6	1,8	1,2	1,4	1,6	1,8
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )		692	692	692	692	673	673	673	673
Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Roulé	518	518	518	518	518	518	518	518
	Concassé	778	778	778	778	778	778	778	778
Eau(kg/m <sup>3</sup> )		287	286	285	284	293	292	291	290
Superplastifiant (kg/m <sup>3</sup> )		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 3.1, un rapport E/C de 0,4 n'est pas efficace, malgré l'augmentation du dosage de superplastifiant 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/C 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 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/C de 0,42 et SP/C de 1,6 sont optimaux pour assurer les meilleures caractéristiques à l'état frais avec le minimum possible du dosage en superplastifiant.

### 3.2.2. Formulation des différents bétons autoplaçants

Les bétons utilisés dans cette recherche sont formulés selon la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par Okamura [2] 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 [5].
- Le rapport 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 3.2.1).
- Le diamètre maximale du gravier est limité par 15 mm, 50% de la quantité de gravier est de fraction 8/15 et l'autre est de 3/8.

Les bétons autoplaçants avec additions sont formulés par la même composition du béton de référence avec une substitution de 15% du volume de ciment par l'une des additions minérales utilisées dans cette étude (calcaire, laitier et pouzzolane). Le tableau 3.2 présente les différentes compositions des bétons autoplaçants fabriqués dans cette étude.

Tableau 3.2 : Composition des différents bétons autoplaçants

Dosages pondéraux Des constituants (kg/m <sup>3</sup> )		Désignation des différents bétons S/M = 0,5 ; G/S = 0,888 ; E/L = 0,42 ; Sp = 1,6 % ; add = 15% C			
		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

### 3.3. Effet des additions minérales sur le comportement des BAP à l'état frais

L'incorporation des additions minérales dans la matrice cimentaire entraîne une modification de la distribution granulaire, l'apparition de nouveaux sites de nucléation et une nouvelle activité des surfaces des grains. Ces modifications des propriétés physico-chimiques des composants du béton, affectent directement les propriétés rhéologiques du béton frais et ses composants.

En outre, lors de la fabrication d'un béton autoplaçant, la caractérisation de son comportement à l'état frais est nécessaire. 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 au remplissage, la capacité au passage et la résistance à la ségrégation. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir des tests empiriques conçus spécifiquement pour évaluer le caractère autoplaçant.

La présente partie d'étude, est consacrée à la vérification de l'autoplaçance de nos différents mélanges, et l'étude de l'influence des additions minérales sur les propriétés rhéologiques des bétons autoplaçants à l'état frais. L'étude est conduite dans un premier temps sur des essais d'ouvrabilité recommandés par l'AFGC [7], où quatre caractéristiques d'ouvrabilité ont été choisies et qui nous les avons jugées suffisantes pour cette étape (diamètre d'étalement, temps d'écoulement, capacité au remplissage  $H_2/H_1$  et résistance à la ségrégation). Dans un second temps, et afin de montrer l'effet des additions minérales sur le comportement rhéologique des différents BAP, l'étude est menée sur une caractérisation de l'écoulement par des essais rhéologiques sur mortier autoplaçant, à l'aide d'un rhéomètre aboutissant à la mesure du seuil de cisaillement statique et à la viscosité apparente.

### 3.3.1. Étalement au cône d'Abrams

Les résultats d'étalement des différents BAP, qui sont présentés sur la figure 3.1, montrent que tous les bétons ont des valeurs d'étalement qui s'inscrivent dans le domaine des bétons autoplaçants ( $650 \leq D \leq 800$  mm) prescrit par la norme NF EN 12350-8 [307] et l'AFGC [7]. On peut dire donc, que la formulation choisit assure une bonne fluidité des bétons quel que soit le type d'additions incorporée.

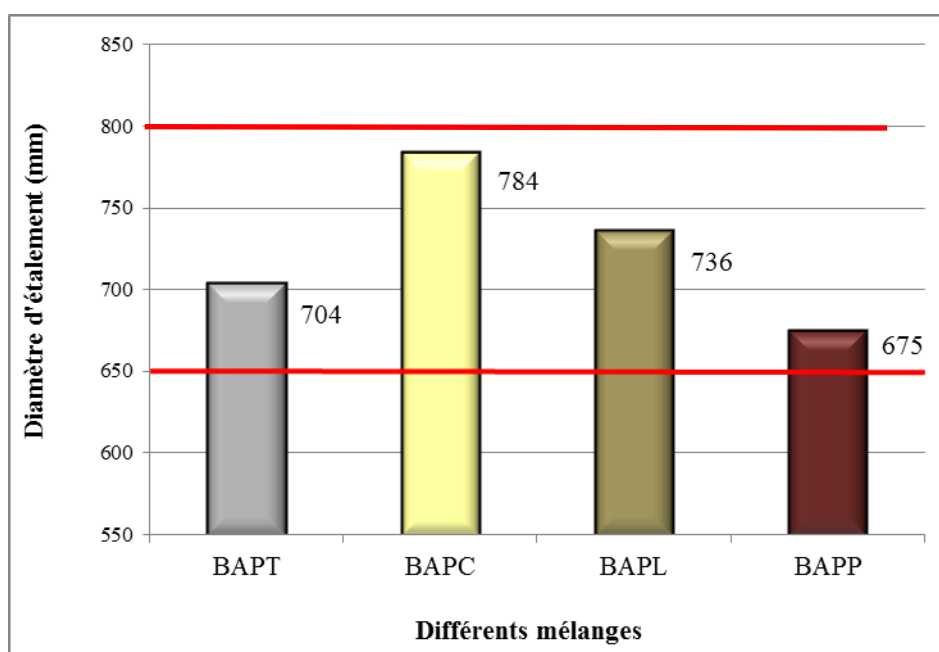


Figure 3.1 : Diamètre d'étalement du BAP en fonction de type d'addition.

L'effet des additions minérales, est très remarquable en termes de leur nature différente, où on peut distinguer deux additions avec un pouvoir fluidifiant remarquable (calcaire et laitier), et autre avec un effet absorbant à l'eau et donnant à la texture un comportement moins fluide (pouzzolane). L'amélioration de la fluidité du BAP apportée par la présence du calcaire ou de laitier conforte celle obtenue par plusieurs auteurs [30, 123, 125, 287, 319,320]. Ceci est peut être attribué à la forme sphérique de leurs grains qui crée un effet de roulement, entre les grains de ciment [62]. De plus, l'activité inerte de ces deux additions, à ce stade de l'hydratation, ainsi que, leur effet filler, libère une partie d'eau de gâchage qui va contribuer à la lubrification des grains et les rendent plus mobiles, ce qui se traduit par une meilleure fluidité du mélange.

L'utilisation de la pouzzolane naturelle entraîne une diminution du diamètre d'étalement, où le BAPP présente le béton le moins fluide avec une valeur d'étalement de 675 mm qui est très proche à la limite inférieure (650 mm), et une baisse de 4%, a été observée par rapport au BAPT. Cette diminution de l'étalement est due à la forte demande en eau et en superplastifiant de la pouzzolane utilisée, ce qui peut être traduit par la forme angulaire et la surface rugueuse des grains de la pouzzolane [291]. En plus de l'activité pouzzolanique de cette addition et la présence d'alumine ( $Al_2O_3$ ) dans le mélange qui influence sur la consommation de l'eau et du superplastifiant et par conséquent pénalise l'étalement [321, 322].

### 3.3.2. Temps d'écoulement $t_{50}$

La mesure du temps d'écoulement  $t_{50}$  est réalisée conjointement avec l'essai d'étalement, il correspond au temps que met la galette du béton pour atteindre un étalement de 500 mm qui nous renseigne sur la vitesse de déformation du béton. La figure 3.2 représente la variation du temps  $t_{50}$  au cône d'Abrams des différents BAP avec et sans additions minérales. On remarque que tous les bétons ont donné des valeurs appartenant à la fourchette recommandée par la norme NF EN 206-9 [15] et l'AFGC [7] ( $2s \leq t_{50} \leq 5s$ ). On peut affirmer que la substitution du ciment par les différentes additions a affecté le temps  $t_{50}$  sans nuire au critère autoplaçant. Le calcaire et le laitier améliorent la fluidité par la réduction des frottements intergranulaires ce qui permet la mise en place la plus rapide du BAP, et donnent respectivement des temps de 2,30 et 2,47s qui sont inférieurs au celui du BAPT (3,5 s). Contrairement, le BAPP a enregistré l'écoulement le plus lent avec un temps d'écoulement de 4,5 s.

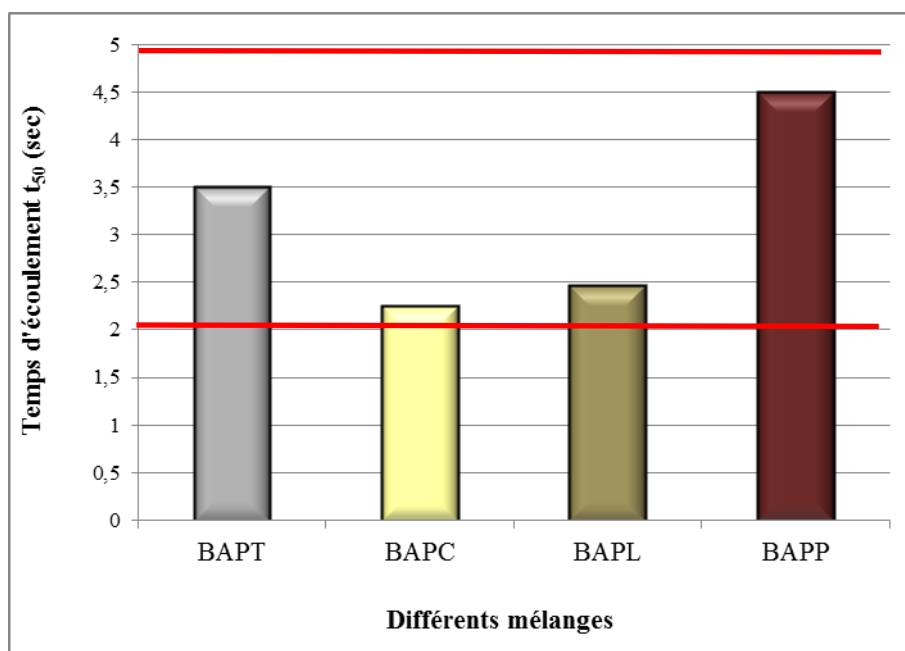


Figure 3.2 : Temps  $t_{50}$  au cône d'Abrams des BAP en fonction du type d'addition.

### 3.3.3. Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V

L'essai du temps d'écoulement dans l'entonnoir en V ( $t_{V-Funnel}$ ) permet de caractériser la fluidité d'un BAP au même titre que l'essai d'étalement au cône d'Abrams. Les résultats obtenus par cet essai en fonction du type d'addition sont représentés sur la figure 3.3.

Sur la base des résultats de la figure 3.3, on remarque que toutes les valeurs du temps d'écoulement dans l'entonnoir en V ( $t_{V-Funnel}$ ) des différents BAP, s'inscrivent dans le domaine recommandé par l'AFGC [7] qui est de 2 à 10 s pour obtenir un béton de viscosité suffisante et une bonne capacité au passage. En termes de stabilité, on peut dire aussi que tous les BAP sont stables car tous les mélanges présentaient un temps d'écoulement dans l'entonnoir inférieur à la valeur recommandée (10 s).

Le plus faible temps d'écoulement a été mesuré pour le BAPC est de 4,1 s, tandis que le BAPP avait le temps d'écoulement le plus élevé de 6,8 s. Par conséquent, la pouzzolane naturel rend le BAP plus visqueux que celui fabriqué avec du calcaire ou du laitier, ce qui confirme les résultats obtenus par Diamantonis et al. [203].

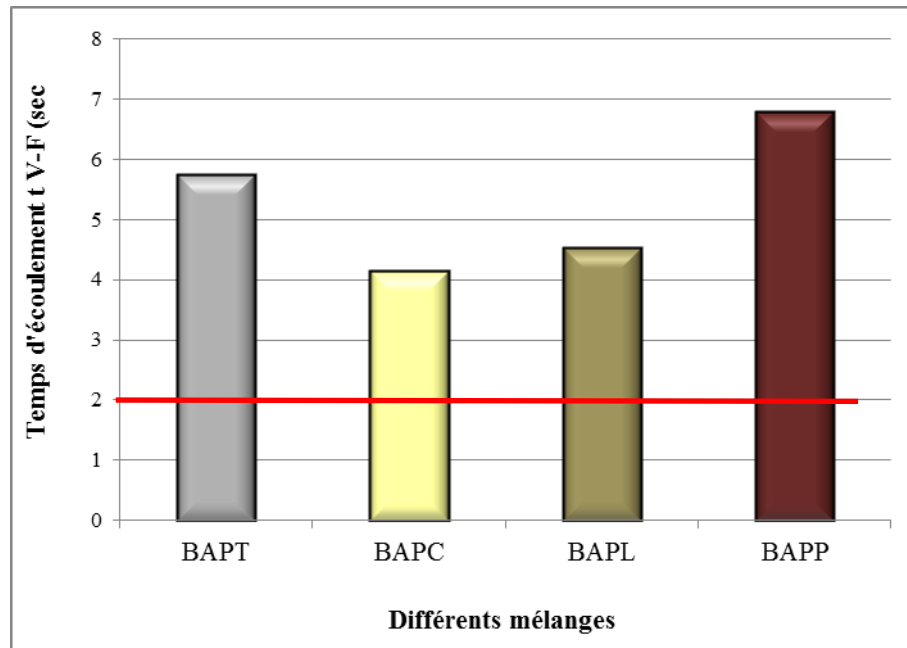


Figure 3.3 : Temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du type d'addition.

#### 3.3.4. Rapport $H_2/H_1$ de l'essai de la Boîte en L (L-Box)

La fluidité pour un béton autoplaçant n'est pas la seule condition à vérifier, en effet, un BAP doit pouvoir passer à travers un ferrailage plus ou moins dense sous l'effet unique de son propre poids. Afin de caractériser la capacité au passage de nos BAP, l'essai à la boîte en L (L-Box) a été appliqué à l'ensemble des mélanges en mesurant le rapport des hauteurs  $H_2/H_1$ . Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3.4, selon ces résultats, tous les BAP ont présenté des taux de remplissage supérieurs à 80 % recommandé par l'AFGC [7] et la norme NF EN 12350-10 [309]. Par conséquent ces bétons ont une bonne mobilité dans un milieu confiné.

L'incorporation des fillers calcaires ou laitier granulé, améliore la capacité au passage et au remplissage du BAP par rapport à la pouzzolane naturelle. En effet, le BAPP a marqué la valeur la plus faible de 0,81 qui augmente légèrement jusqu'à atteindre 0,87 pour un BAPT, contrairement au BAPL et BAPC qui ont présenté une très bonne capacité au passage par des valeurs de 0,91 et 0,97, respectivement.



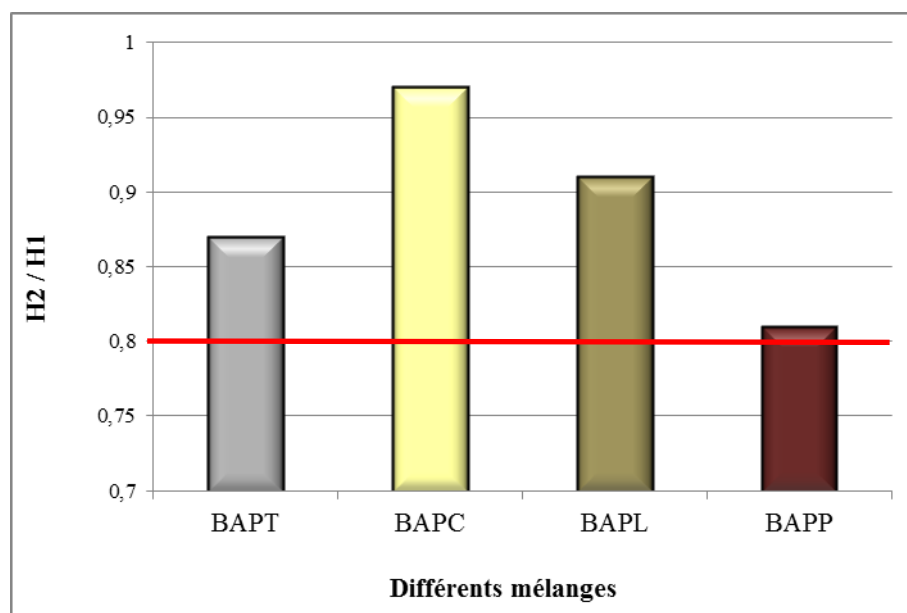


Figure 3.4 : Rapport H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub> de l'essai à la Boîte en L (L-Box) en fonction du type d'addition.

### 3.3.5. Résistance à la ségrégation par tamisage

Selon les recommandations de l'AFGC [7] et la norme NF EN 12350-11 [310], des valeurs de l'indice de ségrégation inférieurs à 15% est le signe d'une bonne résistance à la ségrégation. Les résultats de l'indice de ségrégations des différents BAP utilisés sont présentés dans la figure 3.5. Comme le montre cette figure, tous les BAP testés, ont présenté des valeurs de l'indice entre 2 et 7%, dont la résistance à la ségrégation est considéré comme satisfaisante (laitance <15%).

L'emploi de la pouzzolane naturelle, a permis d'absorber l'eau de ressuage et réduire le pourcentage de laitance dans le mélange en améliorant sa résistance à la ségrégation. Par conséquent les BAPP présentent la plus faible valeur de laitance (2,3%), ce qui le caractérise par une grande stabilité et confirme les résultats trouvés par d'autres chercheurs [178, 204]. Contrairement au calcaire et laitier granulé, qui rend le BAP homogènes mais moins stables, en effet des indices plus élevés par rapport au BAPT, ont été observés par le BAPC et BAPL, 6,2% pour BAPC et 5,5% pour BAPL, contre 4,1 pour le BAPT. Hammat [180], Aparicio et al. [250], ont également constaté que le calcaire et le laitier permettent d'augmenter la fluidité du BAP, mais qu'ils affectent négativement sa stabilité.

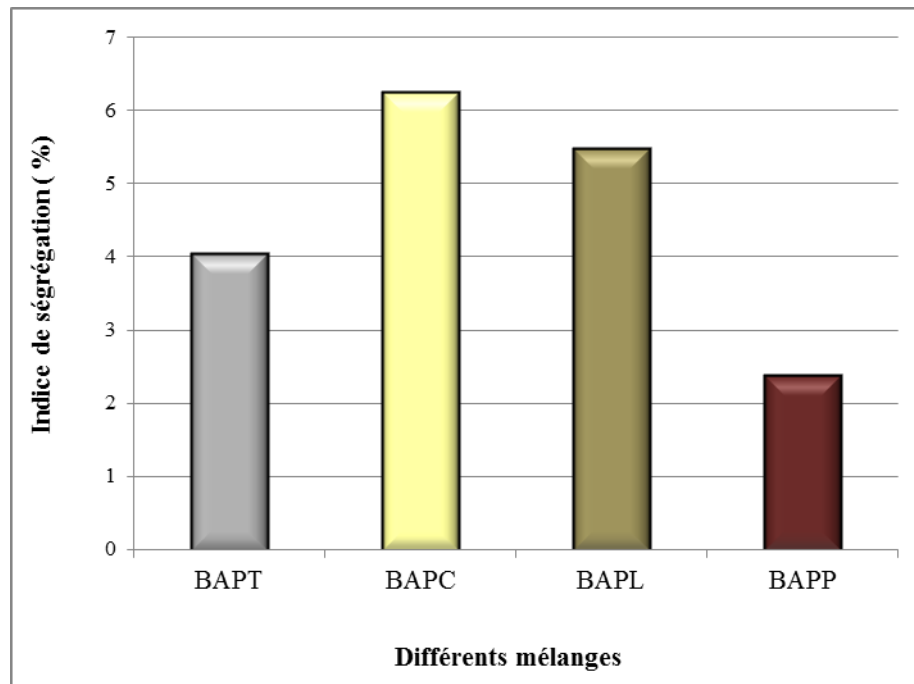


Figure 3.5 : Indice de ségrégation des différents BAP en fonction du type d'addition.

### 3.3.6. Maintien d'ouvrabilité

L'évolution du diamètre d'étalement des différents BAP à 0 ; 30 ; 60 et 90 minutes après malaxage est présentée dans la figure 3.6.

La variation du diamètre d'étalement avec le temps, nous renseigne directement sur le maintien ou la perte d'ouvrabilité des différents BAP. 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 ses valeurs d'étalements sont inférieures à 650 mm à partir de 30 minutes, contrairement au BAPC qui a gardé une bonne ouvrabilité même à 90 minutes. Les BAPL et BAPT sont restés ouvrables jusqu'à 60 minutes. À partir de ces résultats, on peut dire que le type d'additions peut affecter la perte ou le maintien d'ouvrabilité des bétons autoplaçants, et qu'on a moins de 60 minutes pour mettre en place un BAPP, contre 90 minutes pour les BAPC et BAPL.

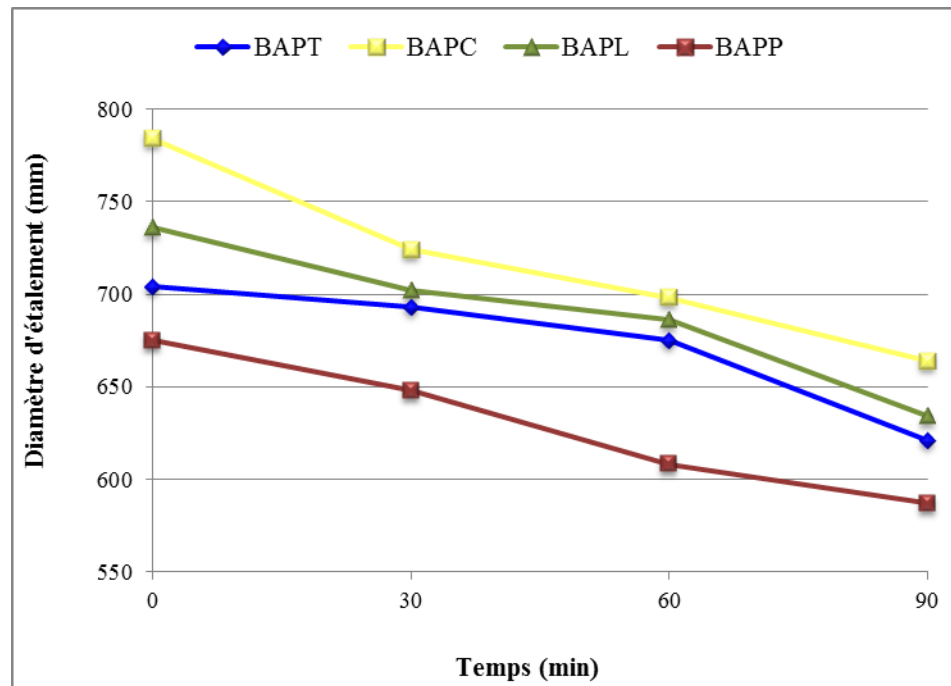


Figure 3.6 : Évolution du diamètre d'étalement des différents BAP en fonction du temps.

### 3.3.7. Les paramètres rhéologiques

Les paramètres rhéologiques des différents mortiers autoplaçants sont mesurés par un rhéomètre élaboré par l'équipe de recherche « Rhéologie du béton » de l'université de Cergy Pontoise. En faisant varier le type d'addition minérale, afin de comprendre la contribution de chaque addition sur le comportement rhéologique du mortier autoplaçant.

La courbe de tendance obtenue à partir des variations de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ( $\tau - \gamma$ ), permet d'estimer la viscosité par la pente de la droite et le seuil de cisaillement du mortier par la contrainte correspondant à une vitesse nulle. Les figures (3.7 - 3.10) présentent les corrélations linéaires entre la contrainte et la vitesse de cisaillement pour les différents mortiers autoplaçants (avec et sans additions). On remarque que tous les mélanges autoplaçants étudiés ont tous montré un comportement linéaire, répondant au comportement viscoplastique décrit par un modèle Binghamien. Ce comportement a été observé aussi par Adjouj [323] sur des mortiers à base des mêmes additions utilisées dans notre étude.

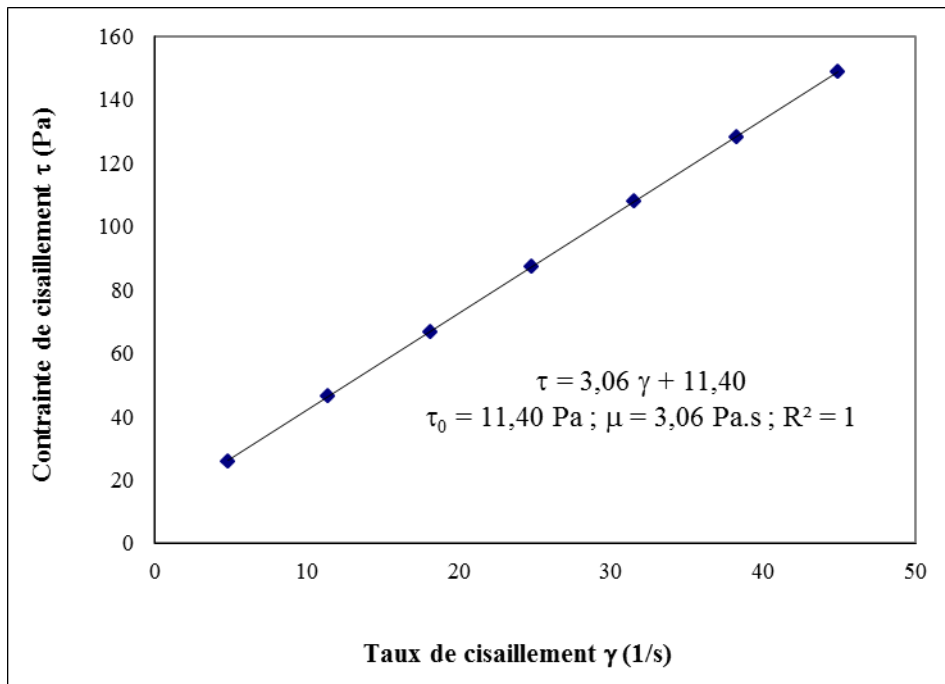


Figure 3.7 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour le MAPT.

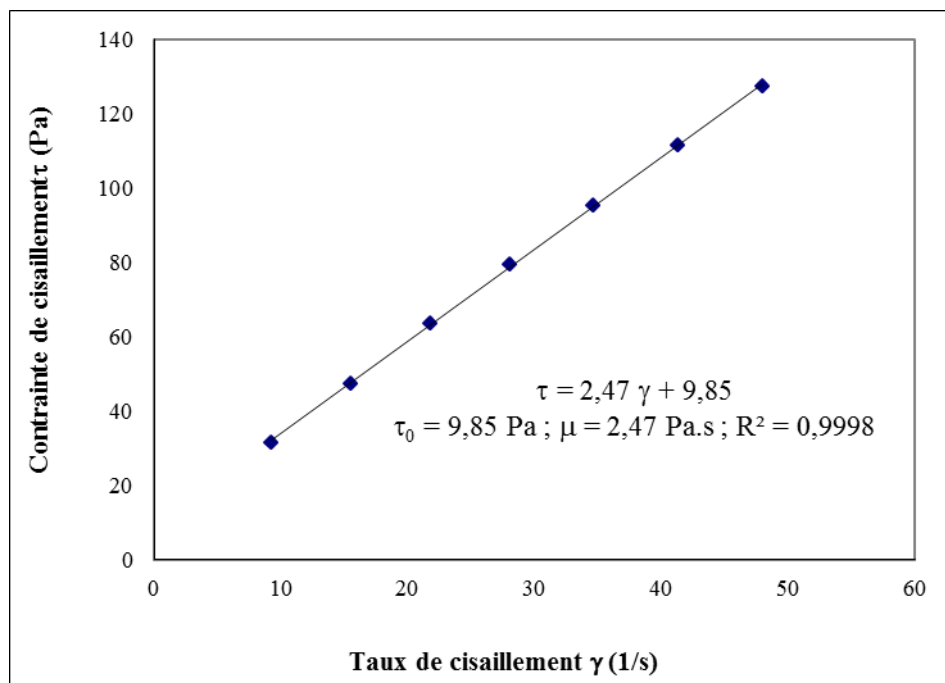


Figure 3.8 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour le MAPC.

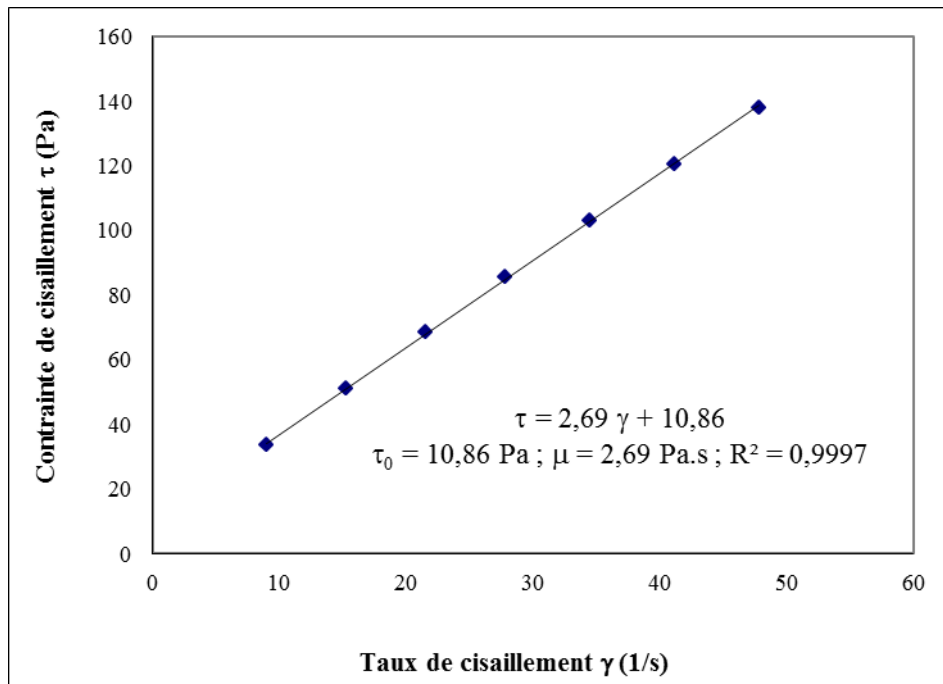


Figure 3.9 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour le MAPL.

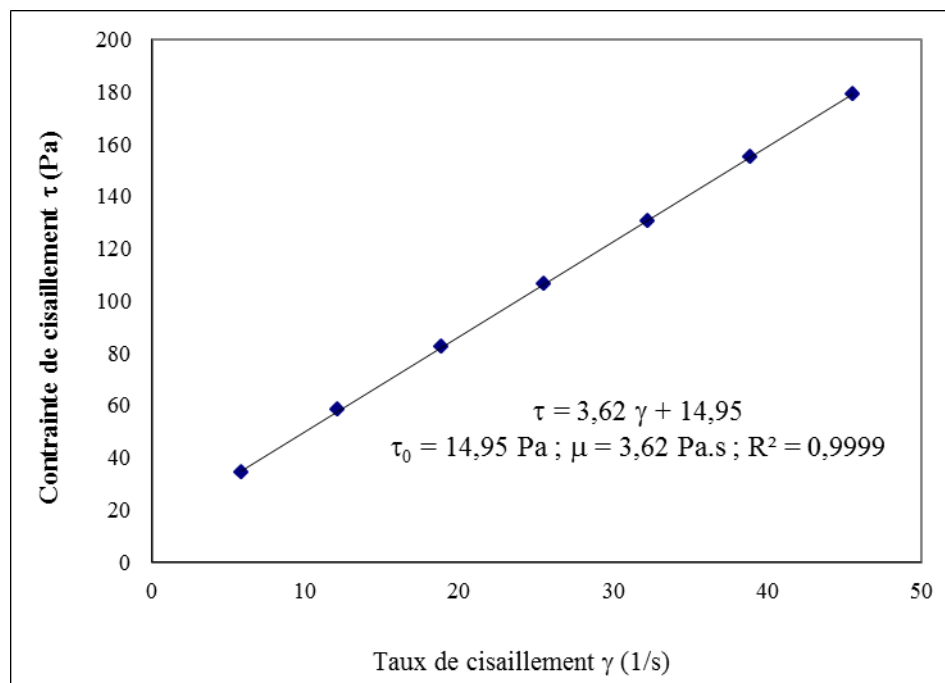


Figure 3.10 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour le MAPP.

### 3.3.7.1. Seuil de cisaillement

La figure 3.11 montre la variation du seuil de cisaillement des mortiers autoplaçants en fonction de la nature de l'addition minérale incorporée.

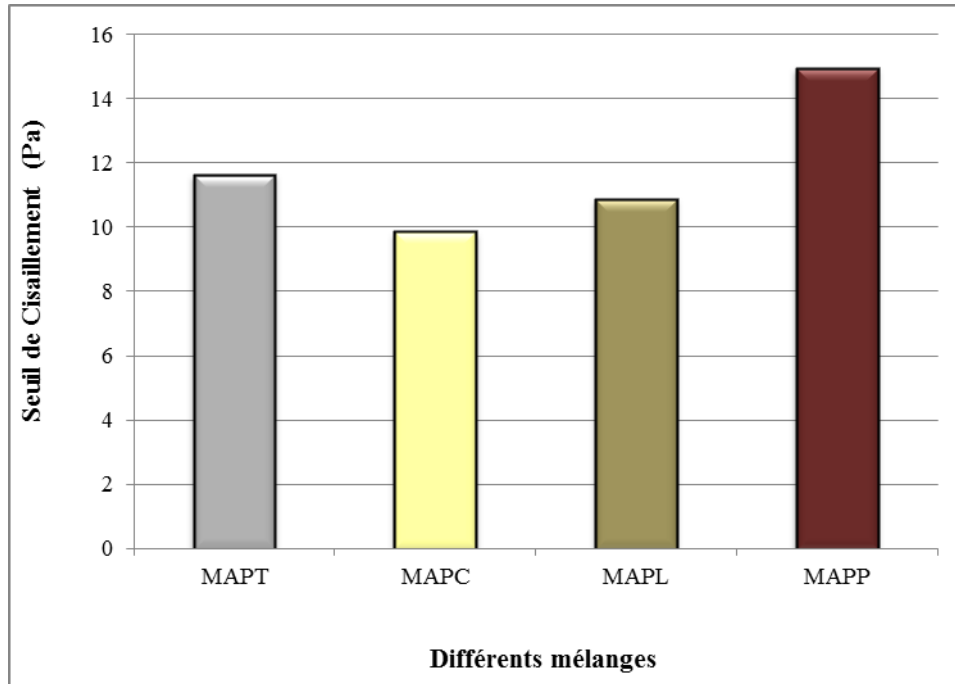


Figure 3.11 : Seuil de cisaillement des différents mortiers autoplaçants.

A partir des résultats illustrés sur la figure 3.11, il est clair que la valeur du seuil de cisaillement des mortiers autoplaçants est identifiée par le type d'addition minérale employée, où les résultats obtenus montrent des effets opposés des additions en fonction de leurs compositions, leurs textures et leurs interactions avec le ciment et le superplastifiant. En présence du calcaire et du laitier granulé, le mortier devient plus fluide et son seuil de cisaillement diminue par rapport au mortier témoin. Une diminution de l'ordre de 14 et 5% est observée pour le mortier à base de calcaire et laitier granulé respectivement, contrairement à la pouzzolane naturelle, qui entraîne une augmentation du seuil de cisaillement de 31% par rapport au mortier témoin. La valeur du seuil s'accroît de 11,4 à 14,95 Pa en substituant le ciment par 15% de pouzzolane naturelle. Il est à noter aussi, que toutes les valeurs du seuil de cisaillement sont inférieures à 15 Pa, ce qui veut donc dire que, quel que soit la nature de l'addition, il est possible d'obtenir des mélanges à faible seuil de cisaillement compatibles avec le comportement autoplaçant.

### 3.3.7.2. Viscosité plastique

La variation de la viscosité plastique des mortiers autoplaçants en fonction du type d'addition minérale utilisée est présentée dans la figure 3.12.

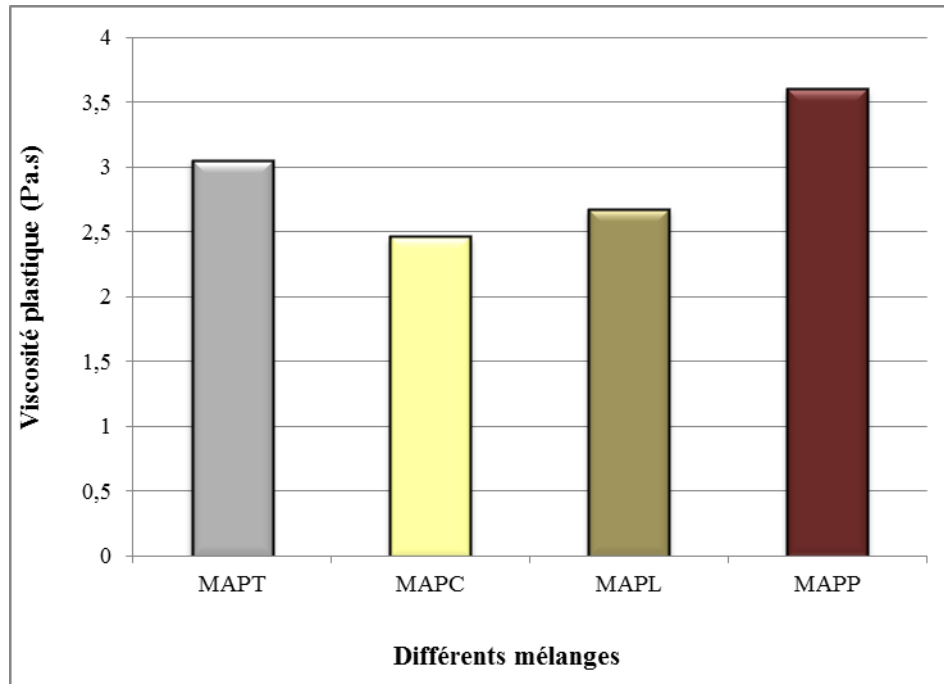


Figure 3.12 : Viscosité plastique des différents mortiers autoplaçants.

Comme pour le cas du seuil de cisaillement, la viscosité plastique du mortier est relativement diminuée en incorporant du calcaire ou laitier granulé. En effet, et en comparaison avec le mortier témoin, on remarque une baisse de 20 et 12% en viscosité plastique des mortiers ayant 15 % de calcaire ou de laitier respectivement. Par contre, pour le mortier renfermant 15% de la pouzzolane naturelle, une augmentation de 18% dans la viscosité plastique par rapport au mortier témoin est observée. Cette addition possède une grande demande en eau, due à un système de vides et de canaux présents dans la structure de leurs grains ce qui influe négativement sur la valeur de la viscosité du mortier.

Adjoudj [323] a également trouvé des résultats similaires, il a montré que la viscosité des mortiers augmente avec la présence de la pouzzolane naturelle, par contre le laitier et le calcaire entraînent une légère diminution de ce dernier. De plus, l'effet du laitier est le plus

important lorsque son taux de substitution atteint 20%. Du même, Shi et al. [324] ont trouvé que la fluidité du béton augmente considérablement et la viscosité plastique diminue lorsque des poudres vitreuses sont partiellement substituées au ciment. Ces derniers ont trouvé que la viscosité plastique du mortier diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à un taux de substitution de 20%, mais au-delà, la diminution est beaucoup moins importante.

D'un autre côté, Taleb [325] a constaté que les fillers calcaires diminuent la viscosité du béton. Park et al. [326] et Gesoglu et Özbay [327] ont observé aussi que la substitution du ciment par le laitier de haut fourneau peut réduire à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité de la pâte de ciment et béton.

Les résultats de la pouzzolane naturelle sont similaires à ceux trouvés par Şahmaran [328] et Hallal et al. [329] dans lesquels l'augmentation de la quantité de zéolite, augmente significativement les interactions entre les particules fines (ciment et addition), et par conséquent l'augmentation du seuil de cisaillement et la viscosité plastique pour un dosage constant en superplastifiant. En effet, ces chercheurs ont trouvé que la viscosité augmente rapidement en fonction du taux de substitution de la pouzzolane naturelle, tels que le seuil de cisaillement est de 3 à 10 fois le seuil de la pâte de ciment sans pouzzolane.

### 3.3.8. Synthèse des résultats à l'état frais

Afin de vérifier les propriétés d'écoulement des bétons autoplaçants avec des additions minérales de natures différentes. Quatre essais d'ouvrabilité sont appliqués pour évaluer six paramètres qui peuvent nous diriger vers une conclusion concernant la faisabilité autoplaçante vis-à-vis de l'incorporation des fillers calcaires, laitier de haut fourneau et la pouzzolane naturelle dans la formulation des bétons autoplaçants. En plus de l'étude de l'effet de ces additions sur les paramètres rhéologiques moyennant de l'essai au rhéomètre pour déterminer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des différents BAP. Les résultats obtenus au cours de cette étude conduisent aux conclusions suivantes :

- Tous les mélanges ont vérifié les propriétés d'écoulement d'un béton autoplaçant. En effet, les trois principales caractéristiques normalisées : capacité au remplissage et au passage et la résistance à la ségrégation qui permettent de garantir la qualité autoplaçante d'un béton sont pratiquement satisfaites par les trois additions utilisées ;



- Les mélanges autoplacants avec des additions minérales présentent un comportement à l'état frais différent que celui du mélange sans addition. Cet effet est lié principalement à la forme et texture différentes des grains ; composition chimique et minéralogique différentes des additions minérales utilisées, ainsi à leur interaction avec le ciment et le superplastifiant ;
- Le calcaire et le laitier granulé agissent très efficacement, en améliorant toutes les paramètres d'écoulement des BAP à l'état frais. Une augmentation de la fluidité, et diminution du seuil de cisaillement et viscosité plastique qui facilitent l'écoulement du béton, avec un maintien d'ouvrabilité jusqu'à 90 min après malaxage, ce qui les rends très bénéfiques pour un bétonnage en climat chaud.
- L'utilisation de la pouzzolane naturelle entraîne une diminution dans les propriétés d'écoulement du mélange. Cette addition possède une grande demande en eau, due à la structure poreuse de ses grains, ainsi à la présence des aluminates et alcalis dans sa composition, ce qui entraîne une augmentation de la viscosité plastique du mélange et, par conséquent, sa stabilité sera améliorée. Mais avec une perte plus rapide de sa ouvrabilité (avant 1h après malaxage), ce qui la rend plus efficace pour un bétonnage en climat froid.

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

#### 3.4. Effet des additions minérales sur la chaleur d'hydratation

L'étude de la cinétique de la chaleur d'hydratation apparaît comme un passage obligé pour comprendre les phénomènes physico-mécaniques qui contrôlent le comportement des matériaux cimentaires. Pour mieux comprendre la contribution des additions minérales sur la cinétique d'hydratation des mélanges autoplacants, cette partie expérimentale est basée sur le suivi de l'évolution du degré d'hydratation pour un mortier autoplacant sans additions minérales et ceux contenant 15% de calcaire, 15% de pouzzolane naturelle ou 15% du laitier granulé. La chaleur est mesurée pour les trois premiers jours après le contact du ciment avec l'eau de gâchage, avec un calorimètre semi adiabatique posé dans une chambre climatique sous une température contrôlée à 20°C (laboratoire L2MGC à Cergy pontoise).

La figure 3.13 représente la variation de la température des différents mélanges en fonction de type d'addition minérale, jusqu'à 72 heures, pour les quatre mortiers autoplaçants étudiés. D'après ces résultats, on constate que la présence des additions minérales retarde et diminue la température maximale à l'intérieur du mélange. La différence des valeurs de la température est évidente entre le mortier de référence MAPT et les autres mortiers à base des additions minérales jusqu'à l'âge de 48 heures, puis cette différence commence à s'atténuer pour devenir presque nulle à 72 heures après le malaxage.

La plus grande température, est mesurée pour le mortier témoin sans aucune addition minérale. Cette température est de l'ordre de 55,4 °C à environ 30 heures après malaxage. Une baisse de température est observée pour tous les mélanges à base d'additions minérales, en effet des températures maximales de 47 ; 47,4 et 44,7 °C sont atteintes pour les mortiers MAPC, MAPL et MAPP respectivement. En outre ces températures maximales sont enregistrées à environ 30 h pour le MAPP et 34 h pour le MAPC et MAPP. On remarque aussi que jusqu'à 18 heures après malaxage, la température est à peine à 24°C pour tous les mélanges, ce qui minimise le risque du retrait et fissuration durant les premières heures de durcissement.

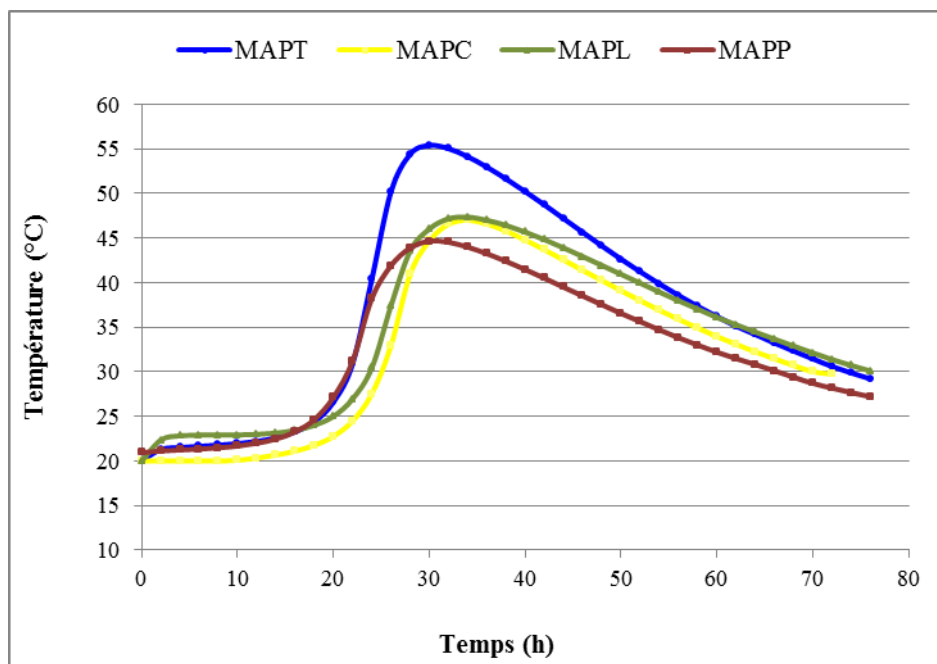


Figure 3.13 : Variation de la température des différents mélanges en fonction du temps.

Les résultats de la variation de la chaleur dégagée lors de l'hydratation des différents mortiers autoplaçants en fonction du temps, pour les trois premiers jours après le contact du ciment avec l'eau de gâchage, sont présentés sur le tableau 3.3, et schématisés sur le graphe de la figure 3.14.

Tableau 3.3 : Valeurs de la chaleur dégagée pour les différents mélanges en fonction du temps

Age (h)	Chaleur d'hydratation (J/g)			
	MAPT	MAPC	MAPL	MAPP
12	14,02	2,73	21,77	12,88
24	116,37	42,85	72,76	106,55
36	236,78	177,49	209,95	172,72
48	241,78	186,7	229,97	179,77
60	235,27	184,31	233,32	177,5
72	231,17	180,24	234,61	173,69

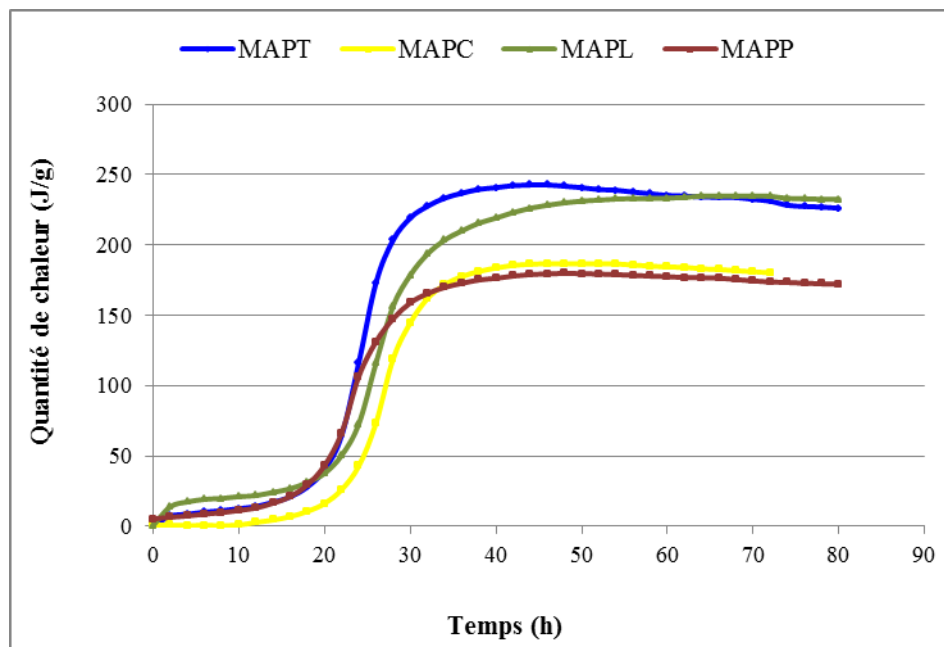


Figure 3.14 : Quantité de chaleur dégagée pour les différents mélanges en fonction du temps.

D'après les résultats des différents mortiers autoplaçants présentés sur le tableau 3.3 et figure 3.14, on remarque une modification de la cinétique d'hydratation et la chaleur résultante des mortiers par la présence des additions minérales. Ce qui est due à la diminution de la phase active du ciment et à la contribution de l'action pouzzolanique et hydraulique de ces additions. Une évolution continue de la chaleur d'hydratation est observée pour tous les mélanges, avec des valeurs rapprochées durant les premières 24 heures. Après deux (02) jours d'hydratation, les courbes illustrées sur la figure 3.14, correspondant aux MAPT, MAPC et MAPP, se stabilisent par contre celle du MAPL continue sa évolution jusqu'à 72h, tout en restant inférieure à celle du mortier témoin.

Le MAPT se caractérise par une hydratation rapide qui atteint 50% de sa valeur finale à 24 heures d'âge, et accomplit 98% durant 36 heures, ce qui engendre des conséquences positives sur la rigidité et des conséquences négatives sur la microstructure qui sera vulnérable à la fissuration précoce si aucune mesure de cure n'est appliquée. Du même le MAPP qui développe 60% de sa chaleur à 24 h et 96% à 36 h, se caractérise aussi par une accélération d'hydratation par rapport aux autres mélanges à base d'additions, mais sa chaleur reste toujours inférieure à celle du MAPT. Il atteint sa valeur maximale de 180 J/g après 2 jours d'hydratation et qui représente une baisse de 25% par rapport au MAPT (242 J/g).

Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par Turanli et al. [204] et Boubekeur [333] et Belaribi [334] où ils ont montré que les ciments composés aux pouzzolanes dégagent moins de chaleur d'hydratation par rapport aux ciments portlands, en raison de la réaction pouzzolanique qui consomme la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Le mortier autoplaçant à base de calcaire présente aussi moins de chaleur d'hydratation à cause de son effet de dilution. La figure 3.14 montre une évolution de la chaleur dégagée inférieure à celle du mortier témoin à premières heures d'hydratation, où le MAPC atteint 23% seulement de sa valeur finale en 24 heures. Mais au bout de 2 jours, ce mortier atteint sa valeur finale de 186.7 J/g et qui représente une baisse de 23% par rapport au MAPT. Ceci confirme l'effet positif de cette addition au jeune âge où l'effet de dilution créé par cette addition inerte est rapidement compensé par son activité physique [333].

Pour le cas du mortier autoplaçant à base de laitier granulé, les courbes de la chaleur dégagée présentées sur la figure 3.14, montrent un dégagement faible pendant les deux premiers jours par rapport à celui du mortier témoin. La valeur de la chaleur dégagée représente 31% de sa valeur finale à un jour, 98% à 2 jours. Après trois jours, l'hydraulicité latente du laitier contribue à faire augmenter la chaleur d'hydratation qui devient presque identique à celle du ciment ordinaire où elle atteint 100% de sa valeur finale. A long terme, cette chaleur peut dépasser celle d'un ciment ordinaire ce qui coïncide avec les résultats trouvés par Boukendakdji [5], Boubekour [333] et Garcia et Sharp [223] qui ont conclu que la chaleur d'hydratation d'un ciment contenant 60% de laitier dépasse celle du ciment ordinaire. Kadri et Duval [335] ont démontré qu'à un premier stade les particules fines accélèrent le taux d'hydratation, ainsi plus la finesse est grande plus le taux de la chaleur d'hydratation est rapide, et cette réactivité conduit à une augmentation de la résistance à la compression.

Ezziane [102] a également trouvé que la substitution du ciment ordinaire par des substances minérales modifie la chaleur finale dégagée, lorsqu'un ciment est remplacé par 10% de laitier, de pouzzolane ou de calcaire, sa chaleur totale dégagée à 4 jours est réduite respectivement de 35 ; 68 et 82 J/g, et que le laitier granulé joue un rôle de retardateur d'hydratation, quel que soit la quantité substituée.

### 3.5. Effet des additions et de la température de cure sur les caractéristiques mécaniques

Cette partie d'étude est consacrée à la présentation et discussion des résultats mécaniques des différents bétons autoplaçants conservés sous différentes températures de cure (20 à 80°C). Il permet d'expliquer l'effet combiné des additions minérales et de la température de murissement sur les propriétés mécaniques des bétons autoplaçants. Pour bien éclaircir, l'analyse des résultats, est présentée en deux parties pour chaque essai.

Dans le but de mettre en évidence la contribution des additions minérales à l'amélioration où la dégradation des propriétés mécaniques des BAP sous différentes températures, une comparaison a été réalisée premièrement entre les propriétés des BAP avec additions et celles du béton témoin pour une même température de cure. En deuxième partie, la comparaison est consacrée à l'effet de l'augmentation de la température sur les propriétés de chaque BAP.

### 3.5.1. Résistance à la compression

#### 3.5.1.1. 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 les figures 3.15 – 3.18. Les résultats de ces figures montrent une progression des résistances mécaniques avec l'âge pour tous les BAP, et quel que soit la température de cure, ce qui est due au développement de l'hydratation en fonction du temps.

Dans les conditions normales (20°C), et par rapport au mortier autoplaçant sans additions (BAPT), les résultats de la figure 3.15 montrent que les meilleures résistances pour tous les âges de durcissement, sont développées par le BAP à base de pouzzolane naturelle, avec des résistances comparables à celle du BAPT jusqu'à 28 jours, et un gain de 5% à 90 jours. Ce qui s'explique par la forte activité pouzzolanique de cette addition qui favorise l'hydratation et confirme les résultats de l'indice d'activité de la pouzzolane présenté au deuxième chapitre (tableau 2.5), et la variation du dégagement de chaleur en fonction du temps présentée au tableau 3.3 et figure 3.14. Ces résultats sont en conformité avec ceux trouvés par d'autres chercheurs [102, 336, 337]. D'autres part, la résistance mécanique peut chuter en dépassant certains taux de substitution où Targan et al. [217] ont enregistré une baisse de 11% à 90 jours avec 30% de pouzzolane.

Le laitier granulé d'El Hadjar avec son activité hydraulique et pouzzolanique latente, a donné des faibles résistances à la compression à jeune âge par rapport au BAPT. Par contre, sa résistance dépasse celle du BAPT par 5% à 90 jours. Ceci confirme les résultats obtenus par plusieurs chercheurs [174, 288, 337], qui ont montré des faibles résistances du béton aux laitiers au jeune âge comparées à celles du béton témoin. Par contre, à long terme, les résistances deviennent comparables sinon meilleures. D'autres chercheurs ont constaté que les meilleures résistances finales sont obtenues pour une addition de 30 % du laitier avec une température de cure de 20 °C [338, 339].

Bien que le calcaire reste inerte et sans activité à cause de l'effet de dilution à jeune âge, le BAPC qui a les plus faibles résistances à 3 jours, ne présente aucun développement dans les résistances mécaniques. En effet des baisses de résistances par rapport au BAPT, sont observées à toutes les échéances d'essai. Ye et al. [129], ont également constaté que l'utilisation de la poudre de calcaire comme filler dans la fabrication d'un BAP, ne participe à

aucune réaction chimique. Ceci est confirmé par une étude précédente où le mortier à base de 10% de calcaire garde la même résistance d'un mortier témoin et celui à base de 20% enregistre une baisse de 18% [340].

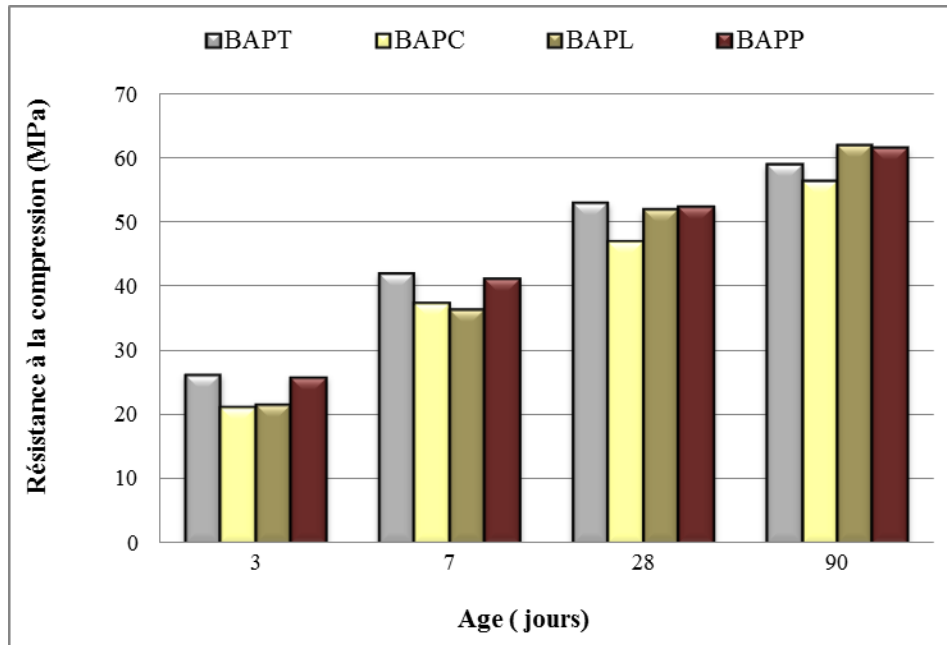


Figure 3.15 : Résistance à la compression en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 20°C.

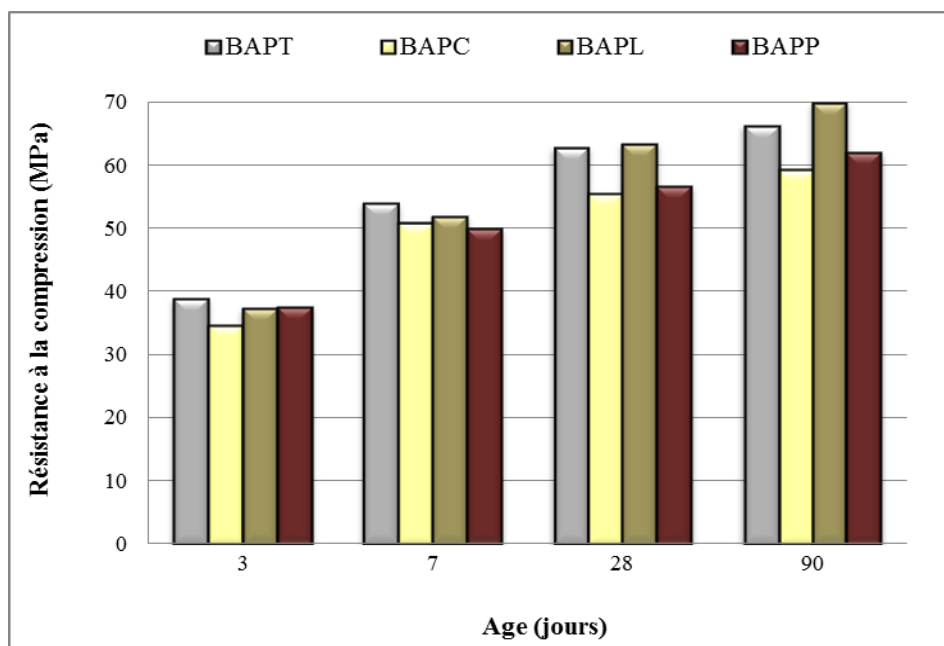


Figure 3.16 : Résistance à la compression en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 40°C.

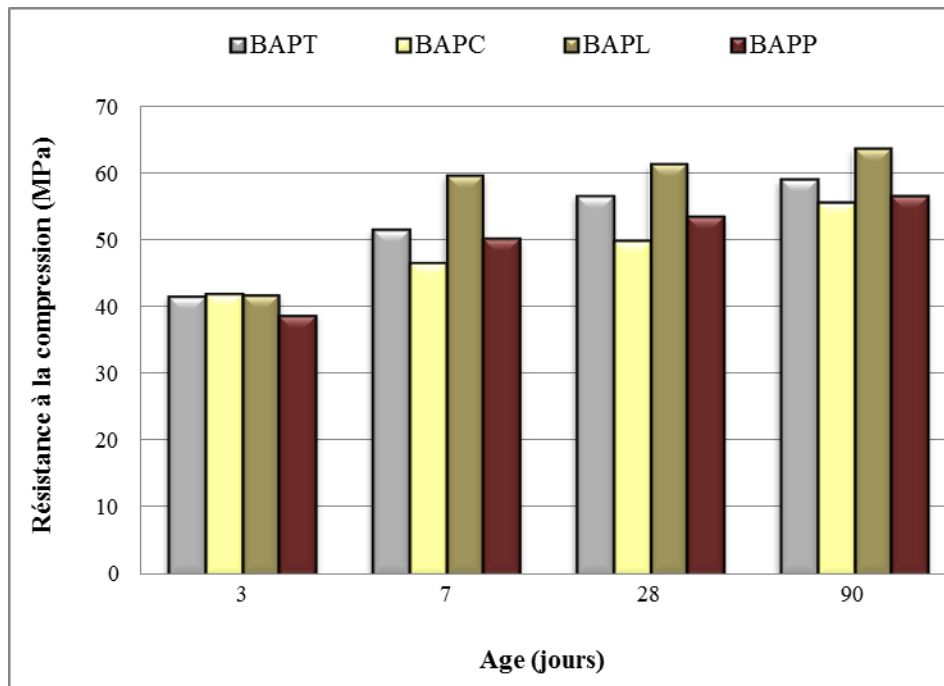


Figure 3.17 : Résistance à la compression en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 60°C.

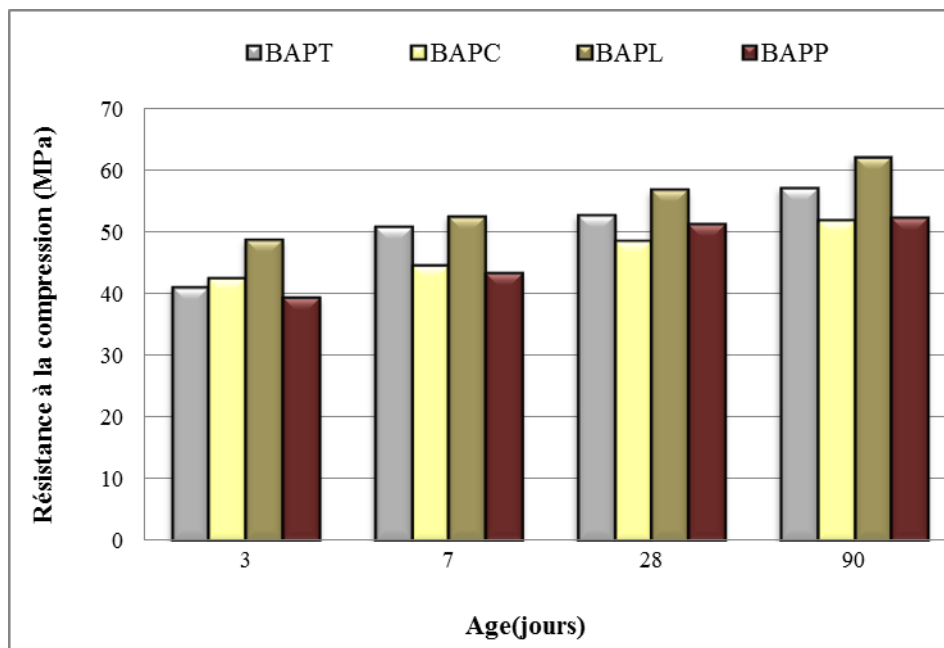


Figure 3.18 : Résistance à la compression en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 80°C.



L'augmentation de la température plus de 40°C, rend les BAPC plus actifs au jeune âge (3 jours). Par conséquent, un gain de 1 et 4 % en résistance est observé à 60°C et 80°C par rapport au BAPT conservé dans les mêmes températures. Mais à partir de 7 jours et quel que soit la température de cure, le calcaire mène à une baisse de résistance par rapport au BAPT pour tous les âges. Boubekeur [338] a observé que l'incorporation de 10% de filler calcaire, augmente la résistance du mortier conservé à plus de 40°C. Mais au-delà de 7 jours, une baisse très importante est observée par rapport au mortier de référence. Selon Ramezani pour et al. [233], cela peut s'expliquer par le fait que les particules de calcaire agissent comme sites de nucléation et augmentent donc l'hydratation précoce du ciment, ce qui peut conduire à une cristallisation plus désorientée de la CH et à une perte de résistance à long terme.

L'incorporation de 20% de calcaire dans un béton autoplaçant est plus efficace à 28 et 90 jours avec un traitement thermique de 60°C que sans traitement thermique [127]. Contrairement à Hadj sadouk [341], qui 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.

Le laitier des hauts fourneaux a présenté la meilleure efficacité avec l'augmentation de la température de cure. En effet, des différences de -17,04 ; -3,87 ; 0,42 et 19,10% à 3 jours et 4,82 ; 5,62 ; 7,95 et 8,55% à 90 jours, ont été observés entre le BAPL et BAPT à 20, 40, 60 et 80°C respectivement. L'augmentation de la résistance se présente à un âge précoce plus la température est élevée. Le gain de résistance est observé à partir de 90 jours et 28 jours pour les températures 20°C et 40°C respectivement, et à partir de 3 jours pour 60°C et 80°C, ce qui confirme les résultats trouvés par d'autres chercheurs [127, 248, 342]. En outre, la pouzzolane naturelle s'avère inefficace en termes de résistance, avec l'élévation de la température, où une diminution de la résistance est observée à tous les âges à partir de 40°C.

Dans la littérature, il est rapporté que le ciment au laitier est plus sensible à l'élévation de la température de cure que le ciment Portland [343]. Battagin [344] a montré que le degré d'hydratation du laitier augmente considérablement avec la température, où 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. Selon Rose [345] l'activité du laitier granulé, 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.

D'autres part, Escalante-Garcia et Sharp [223] ont étudié l'effet de la variation de température entre 10 et 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. Aussi, 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.

En outre, le laitier granulé est plus sensible au manque de cure humide que le CPA, où Austin et Robins [342], ont rapporté qu'entre 7 et 28 jours dans un climat chaud, la cure humide d'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. Ma et al. [238] 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.

D'après les résultats d'Ezziane [102] sur l'effet combiné des additions minérales et températures de cure, des diminutions très importantes sont révélées pour 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. Turkel et Alabas [262] ont aussi montré que les ciments composés sont plus performants sous des cures à températures élevées et qu'ils ne subissent pas de fortes chutes de résistance à la compression.

#### 3.5.1.2. Effet de la température de cure

Les résultats de la résistance à la compression en fonction de la température de cure et l'âge des différents BAP sont présentés par les figures (3.19 – 3.22). On constate de ces résultats, que la résistance des BAP est fortement influencée par la variation de la température comme pour le cas des bétons vibrés. Tous les BAP ont marqué une augmentation de la résistance à jeune âge (3 jours) avec l'augmentation de la température comme prévue initialement, 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 le BAPL qui montre une augmentation linéaire des résistances, avec un gain de 71 ; 92 ; et 124% à 40, 60 et 80°C, respectivement.

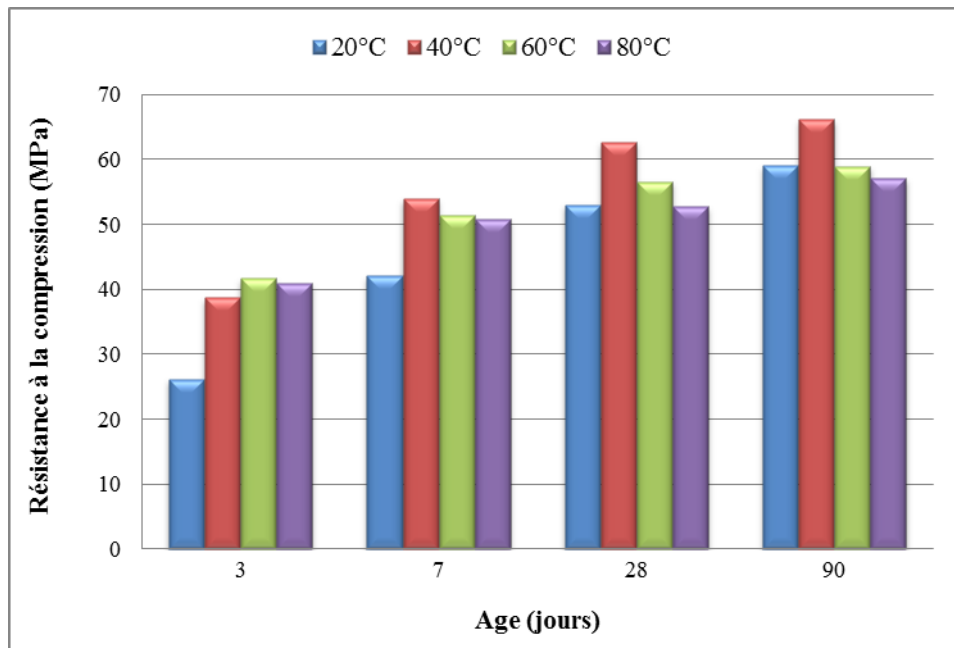


Figure 3.19 : Résistance à la compression en fonction de l'âge et température de cure du BAPT.

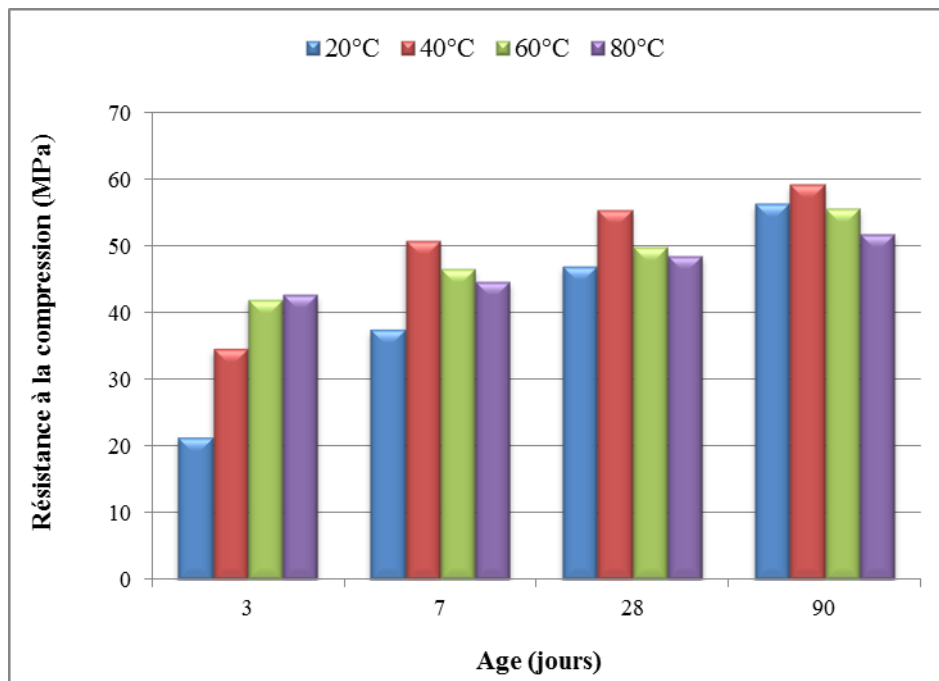


Figure 3.20 : Résistance à la compression en fonction de l'âge et température de cure du BAPC.

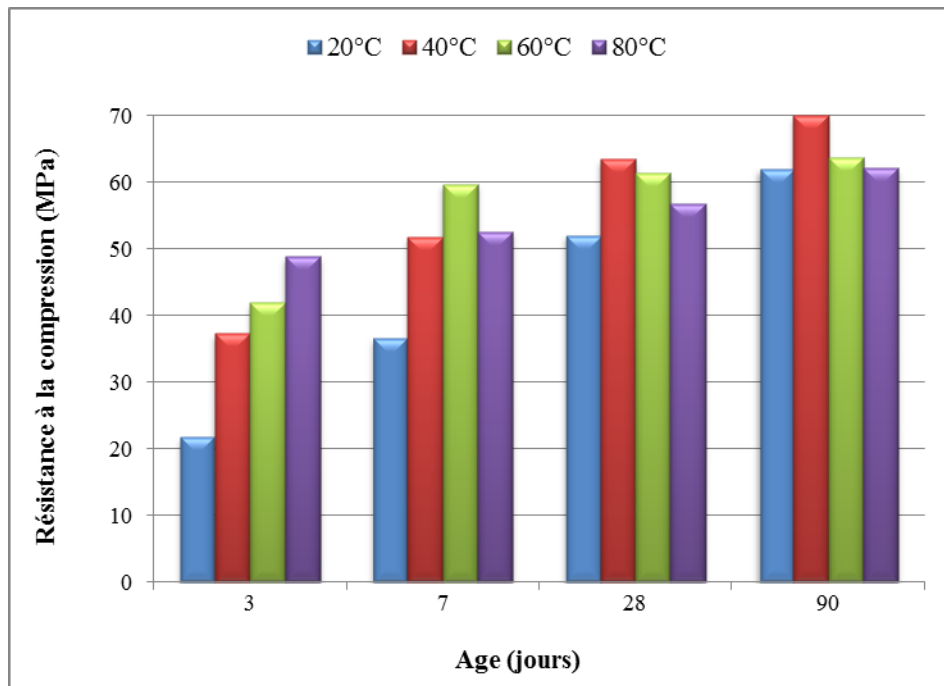


Figure 3.21 : Résistance à la compression en fonction de l'âge et température de cure du BAPL.

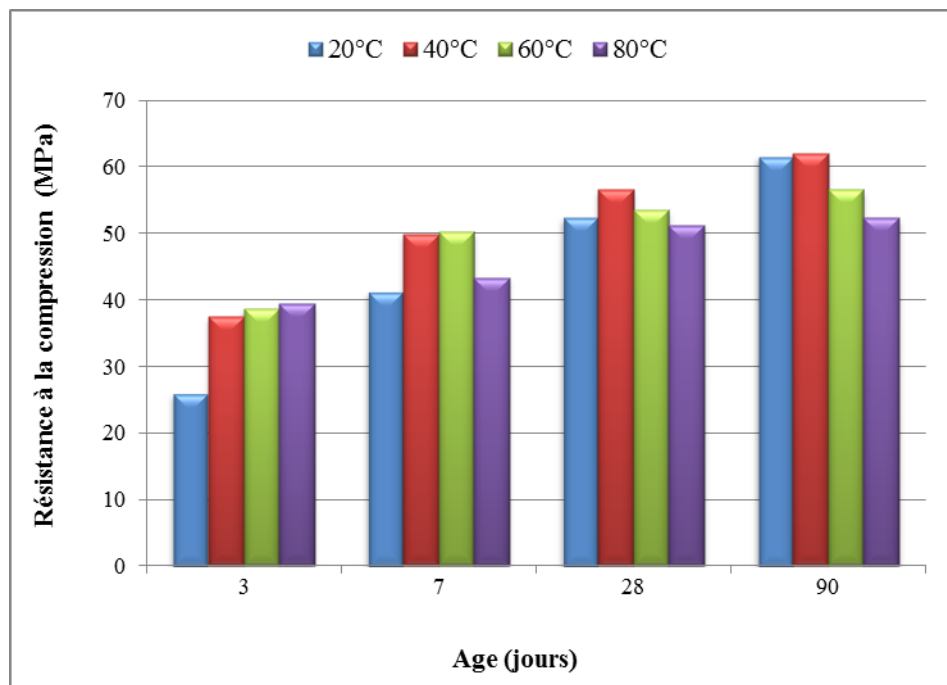


Figure 3.22 : Résistance à la compression en fonction de l'âge et température de cure du BAPP.

Au-delà de 7 jours de durcissement, la température optimale pour avoir les meilleures résistances pour tous les mélanges à court et long terme, est de 40°C, ce qui entraîne une amélioration significative de la résistance à jeune âge sans la nuire à long terme. En effet, l'augmentation est respectivement de 48 ; 62 ; 71 et 45% à 3 jours et de 12, ; 5 ; 13 et 1% à 90 jours pour les BAPT, BAPC, BAPL et BAPP respectivement par rapport à ceux conservés à 20°C. Ce gain de résistance à des âges avancés, est dû à une prolongation de l'hydratation qui est favorisée sous cette température. Des résultats similaires ont été rapportés par Bougara et al. [168], qui ont constaté que la température de durcissement de 40°C, semble être optimale pour le développement de la résistance du béton à base des additions minérales.

L'augmentation de la température de cure à 60°C est plus efficace à jeune âge qu'à 28 et 90 jours, ce qui entraîne des améliorations de la résistance de tous les BAP, à un âge précoce sans la pénaliser à long terme. En effet, des résistances comparables à 90 jours, sont observées pour le BAPT, BAPC et BAPL entre 20 et 60°C. Et une légère diminution de 8%, est observée pour le BAPP.

La température de 80°C qui a le cout énergétique le plus élevé, s'avère inefficace pour la résistance du BAP à moyen et long terme. En effet, des résistances similaires ont été observées pour le BAPT, BAPC et BAPP à 3 jours entre 60 et 80°C (40 MPa). Et une perte de 3, 8 et 15% à 90 jours par rapport aux mêmes BAP conservés à 20°C. De plus, le BAP à base de laitier granulé sous cette température (80°C), présente la résistance la plus élevée (49 MPa) à 3 jours, par rapport aux autres mélanges à la même température, avec une résistance comparable au même BAP conservé à 20°C à 90 jours.

D'après les résultats des figures (3.19 – 3.22), et l'ensemble des analyses et comparaisons réalisées, on peut constater que l'augmentation de la température de cure entre 20 et 80°C, entraîne une amélioration dans les résistances à la compression de tous les BAP à jeune âge sans nuire fortement ces dernières à long terme. D'après Tan et Gjorv [246], l'élévation de la température de cure, a un effet moins néfaste sur la résistance à la compression des BHP que dans le cas du béton usuel, leurs 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 BHP. 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 durcissement, sera suffisante pour remplir tous les espaces intergranulaires et par conséquent,

la diminution du taux d'hydratation dans la période qui suit, causer par l'augmentation de la température de murissement, n'affecte pas la résistance à long terme.

L'effet de l'élévation de la température sur la résistance à la compression des bétons autoplaçant avec une proportion de 20% de calcaire, a été aussi étudié par Ali [236]. Les résultats trouvés ont prouvé l'amélioration des résistances jusqu'à 28 jours pour des températures de 60 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. Selon Charbel [235], l'augmentation de la température de cure de 20 à 35°C a amélioré la résistance à 3 jours des BAP à haute performance contenant différents pourcentages de laitier. L'auteur a constaté aussi que cette augmentation de température n'a pas affecté le processus d'hydratation, en effet une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la température a été observée à 56 jours.

Une autre étude faite par Derabla et larbi [127] sur l'effet d'un traitement de cure à 60°C des BAP contenant 20% de calcaire et des BAP avec 20% de laitier, ils ont prouvé une augmentation importante de la résistance à jeune âge pour les deux (02) BAP. Mais cette dernière devient moins importante à 28 jours, même une faible diminution est observée à 180 jours pour le BAPC, et des résistances comparables à celles du béton sans traitement thermique sont observées à long terme pour le BAPL. Ramezianpour et al. [234] ont 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 a un effet néfaste plus apparent sur la résistance à 28 et 90 jours et plus apparent que son effet bénéfique à jeune âge. Les résistances ont été de 24 ; 42 ; 53 et 54 MPa à 60°C, contre 25 ; 43 ; 49 et 51 MPa pour 70°C à 3 ; 7 ; 28 et 90 jours respectivement.

Luke et Glasser [346] ont étudié des pâtes renfermant 30% de laitier à des températures allant de 25 à 55°C, et ont observé que l'hydratation du laitier augmente systématiquement avec la température. Kellouche et Bougara [232] ont 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 à 40°C et qui peut dépasser celle de la pâte témoin au-delà de 90 jours. Ces auteurs ont conclu 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 28 jours.

Ezziane [102] a varié la température de cure entre 20 et 60°C avec un pas de 20°C, sur des mortiers contenant 20% de la pouzzolane naturelle avec une finesse similaire à celle du ciment. L'auteur a trouvé que par rapport à la cure de 20°C, la cure à 40°C a augmenté la résistance à la compression de 22% à 3 jours et cette augmentation diminue de 7% à 7 jours. Par contre, il a remarqué une faible diminution de résistance de l'ordre de 4 et 3% à 28 et 90 jours, respectivement. Le même effet est remarqué pour une cure de 60°C mais plus apparent à 3 et 7 jours, où une augmentation de 44 et 26 % a été observée, contre une diminution de 6 et 13% à l'âge de 28 et 90 jours.

### 3.5.2. Résistance à la traction

#### 3.5.2.1. Effet des additions

L'effet des additions minérales sur la résistance à la traction par flexion en fonction de la température de cure à 3 ; 7 ; 28 et 90 jours, est présenté par les figures (3.23 – 3.26). Les résultats de ces figures montrent une évolution progressive de la résistance à la traction par flexion au cours du temps pour tous les BAP et quel que soit la température de murissement.

Les résultats obtenus à une cure de 20°C montrent l'effet négatif des additions minérales sur les résistances initiales des BAP. Une diminution de l'ordre de 16 ; 32 ; et 39 % a été observée à trois (03) jours pour BAPC, BAPL et BAPP respectivement par rapport au BAPT. Cette diminution devient 12 ; 12 ; et 15% à sept (07) jours et presque nulle à 28 jours, là où la figure 3.23 montre presque une accordance entre les résistances des différents BAP. La diminution de la résistance à la traction des BAP à base de calcaire, a été confirmée aussi par Parra et al. [42]. Boubekeur [333], a aussi trouvé que la résistance à la flexion du mortier contenant 10% de calcaire diminue de 5 et 6% par rapport au mortier témoin à 28 et 90 jours, respectivement.

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 terme de gain des BAPC et BAPL par rapport au BAPT respectivement, avec une légère diminution de 4% a été observée pour le BAPP. Il est à noter que la meilleure résistance à la traction par flexion, est observée pour le BAP à base de 15% de laitier granulé, avec une valeur d'environ 9 MPa. Cette addition est un produit hydrauliquement latent qui ne trouve son activité que dans les milieux basiques qui ne sont disponibles qu'après l'hydratation d'une partie du ciment et la libération d'une quantité

suffisante de chaux. L'amélioration de la résistance à la traction par flexion d'un BAP contenant 15% de laitier granulé à 90 jours, a été observée aussi par Boukendakdji [5]. Boubekeur [333] a également montré que l'incorporation de 30 % de laitier développe des résistances à la traction dépassants celles du mortier de contrôle à long terme (28 et 90 jours).

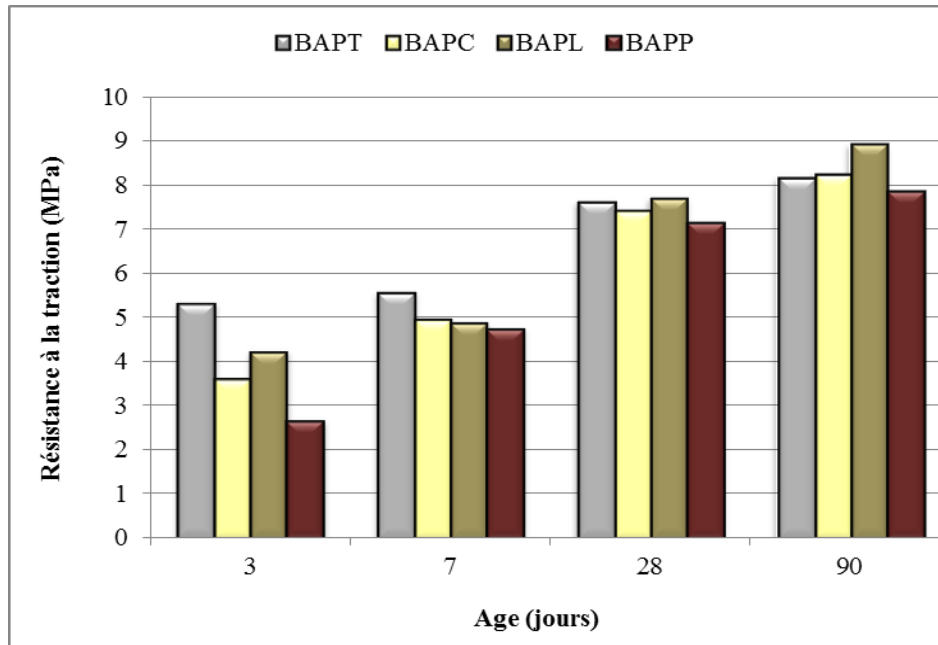


Figure 3.23 : Résistance à la traction en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 20°C.

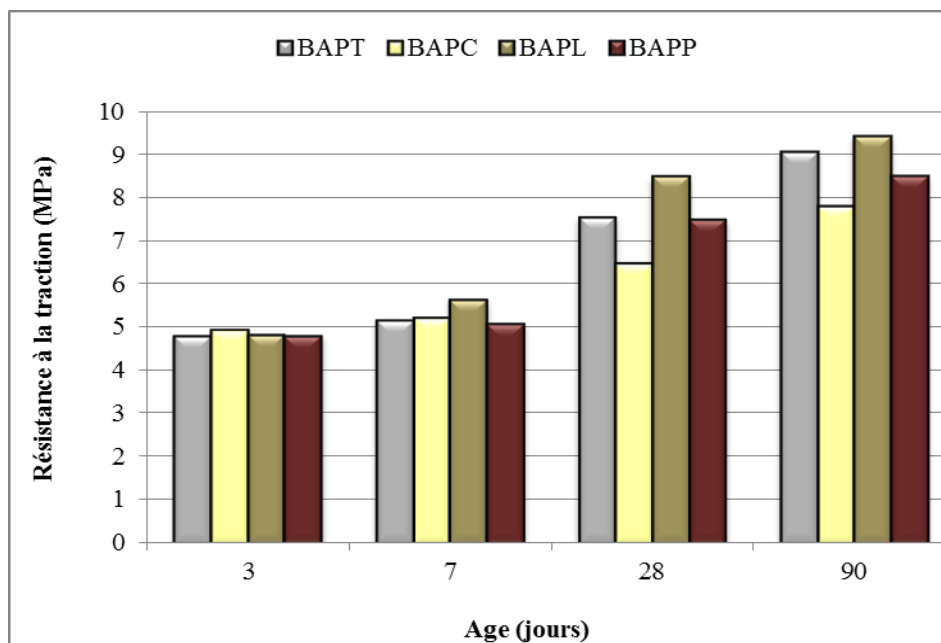


Figure 3.24 : Résistance à la traction en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 40°C.



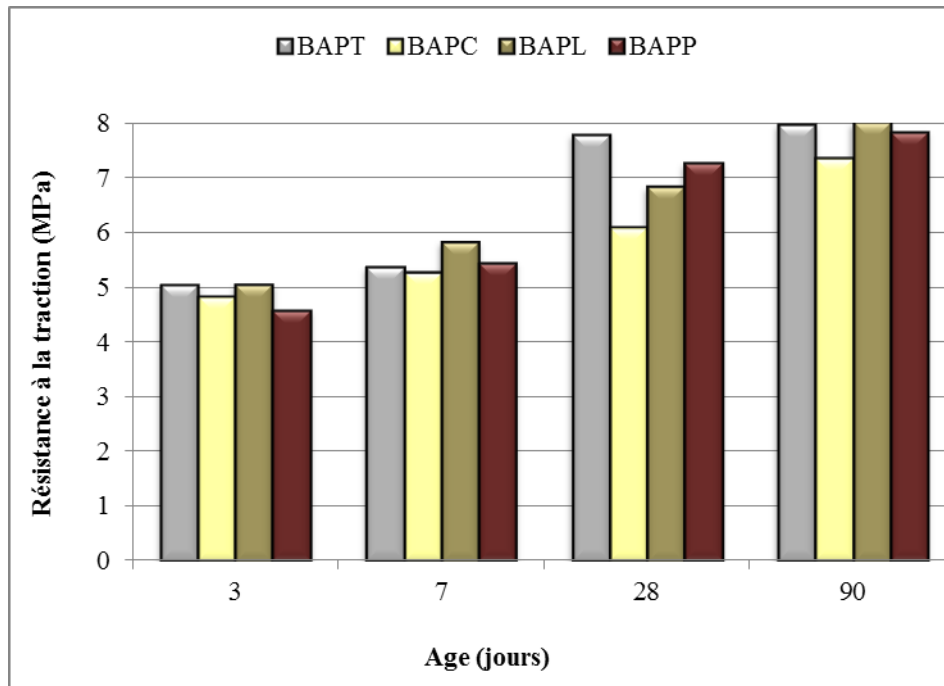


Figure 3.25 : Résistance à la traction en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 60°C.

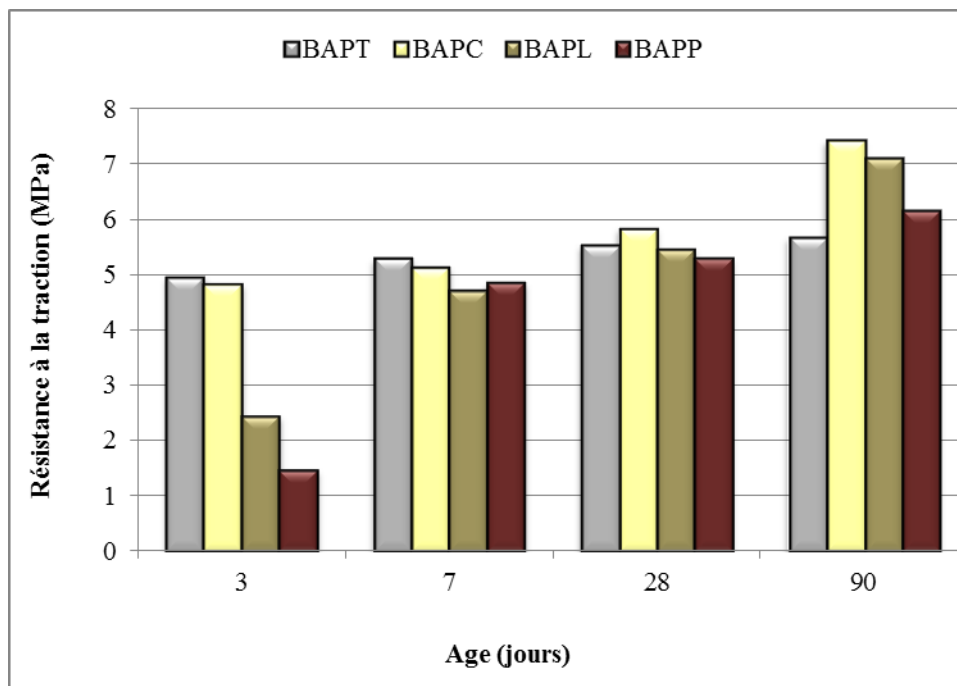


Figure 3.26 : Résistance à la traction en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 80°C.

L'augmentation de la température de cure à 40 et 60°C, entraîne une amélioration de l'efficacité de toutes les additions minérales à jeune âge. En effet, des résistances comparables à celles du BAPT, ont été observées pour tous les mélanges à 3 et 7 jours de durcissement. Mais au-delà de 28 jours, cet effet positif des additions, s'inverse pour le cas du calcaire et pouzzolane, là où une diminution de la résistance est marquée pour le BAPC et BAPP par rapport au BAPT. Cette diminution de résistance est plus importante pour le BAPC que le BAPP. Cependant, le laitier granulé a montré une bonne activité sous des températures élevées et pour tous les âges. En effet le BAPL a présenté les meilleures résistances à 40°C, avec des améliorations de 12 et 4% par rapport au BAPT à 28 et 90 respectivement sous cette température (40°C), et des résistances similaires à 60°C que le BAPT à 90 jours.

À des températures plus élevées (80°C), le calcaire s'avère l'addition la plus efficace au BAP par rapport aux laitier et pouzzolane. En effet le BAPC a présenté des résistances à la traction similaires à celle du BAPT à 3 et 7 jours, avec et une amélioration de 5 et 26% à 28 jours et 90 jours. Cependant, à la même température (80°C), les BAPL et BAPP, ont présenté respectivement des diminutions de résistance de 51 et 71% par rapport au BAPT à 3 jours. Cet effet négatif à jeune âge, s'inverse à long terme, où une augmentation de 36 et 8% est observée par ces deux BAP par rapport au BAPT à 90 jours. Ceci est probablement dû à la réaction pouzzolanique de la pouzzolane naturelle et la réaction hydraulique latente du laitier granulé, qui déclenchent et engendrent une augmentation des résistances à long terme.

L'effet des additions minérales sur la résistance à la traction des bétons muris sous températures de cure élevées a fait l'objet de plusieurs études. Hadj Sadouk [343] a montré que l'élévation de la température, fait amélioré les résistances à la traction à jeune âge des mortiers contenant différents taux de calcaire (5 ; 10 ; 15 et 20%) par rapport au mortier sans addition. Une diminution de la résistance à la traction est observée dans les conditions de cure normales pour les différents mortiers à base de calcaire, par contre cette diminution est observée qu'à partir de 7 jours pour les mêmes mortiers dans un climat chaud. Boukni et al. [140] ont montré également, une augmentation de la résistance à la traction des bétons autoplaçants conservés à différentes températures de cure (20, 40 et 60°C), avec l'augmentation du taux de filler calcaire.

Dans le même contexte, Kanstad et al. [226] ont étudié l'effet de la température de cure sur les propriétés mécaniques d'un béton de haute performance contenant des additions minérales. Ils ont montré que les BHP 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.

Yazıcı et al. [297] ont observé que l'augmentation de la température de cure fait diminuer la résistance à la flexion du béton par rapport au celui muris à 20°C. Toutefois, l'emploi des additions minérales, tel que les cendres volantes et laitier granulé diminue cet effet négatif. Ce résultat est confirmé aussi par les travaux de Kejin et Zhi [347], qui ont prouvé aussi, que le risque de fissuration sous l'effet d'un traitement thermique, est plus faible dans le cas des bétons contenant des additions minérales.

#### 3.5.2.2. Effet de la température de cure

Les résultats de la résistance à la traction par flexion pour les différents BAP contenant 15% d'addition minérale (calcaire, laitier ou pouzzolane), en fonction de la température de cure et l'âge du béton, sont présentés sur les figures (3.27 – 3.30). Il est à noter que l'évolution de la résistance à la 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.

On remarque, qu'au jeune âge, et comme pour le cas de la résistance à la compression, l'augmentation de la température de cure, entraîne une augmentation de la résistance à la traction par flexion de tous les mélanges. En effet, un gain de 14 et 16% à 40°C ; 81 et 72% à 60°C respectivement est observé pour les BAPL et BAPP par rapport à ceux à 20°C à trois (03) jours. Cette différence devienne de 16 et 20% pour les BAPL ; 7 et 15% pour les BAPP à sept (7) jours. 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.

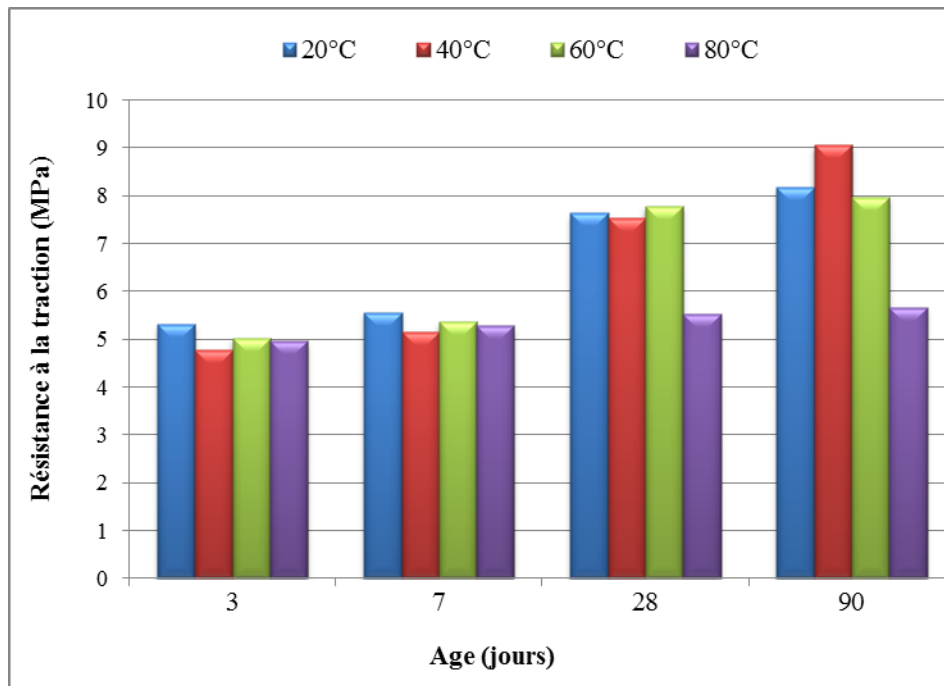


Figure 3.27 : Résistance à la traction en fonction de l'âge et température de cure du BAPT.

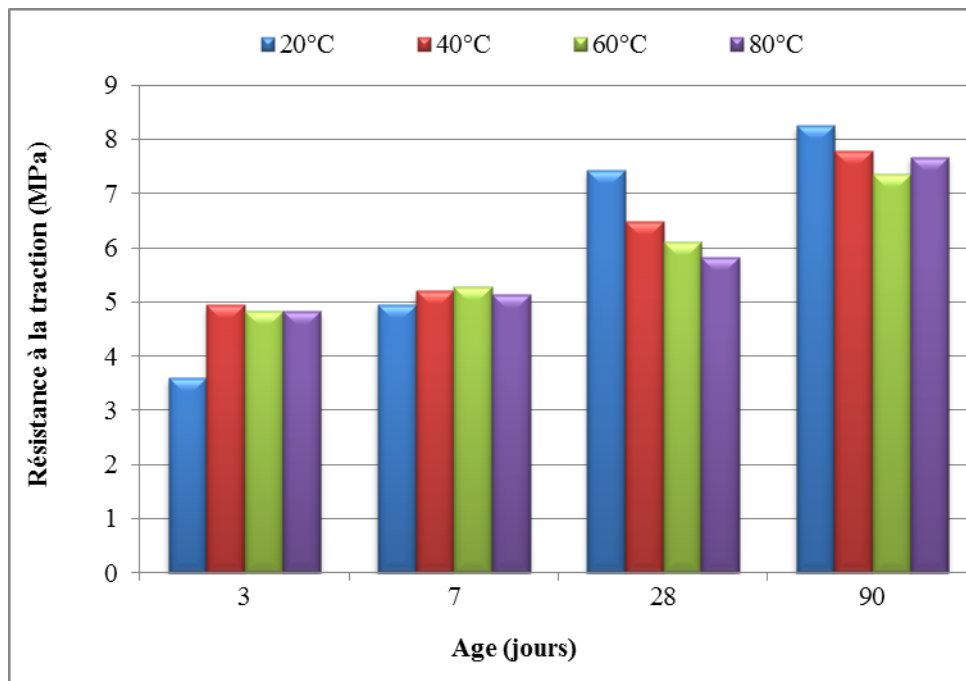


Figure 3.28 : Résistance à la traction en fonction de l'âge et température de cure du BAPC.

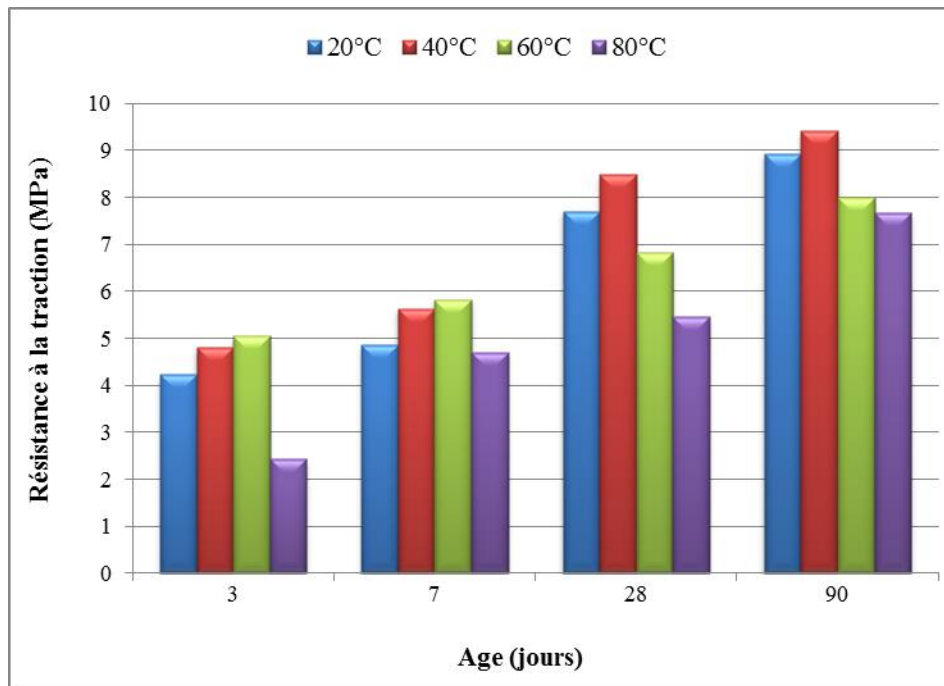


Figure 3.29 : Résistance à la traction en fonction de l'âge et température de cure du BAPL.

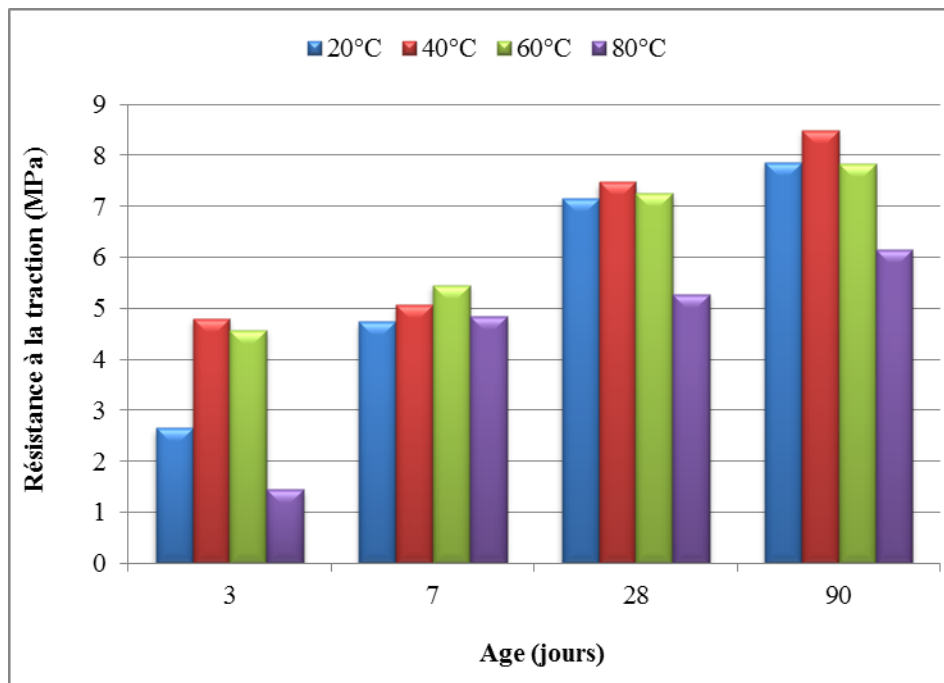


Figure 3.30 : Résistance à la traction en fonction de l'âge et température de cure du BAPP.

A partir de 28 jours, l'élévation de la température à 40°C, entraîne une amélioration dans la résistance des BAPT, BAPL et BAPP par rapport à 20°C. En effet, une amélioration de l'ordre de 11% a été remarquée à 90 jours pour le BAPT par rapport à 20°C. Par contre, cette température présente un effet négatif sur les résistances des BAP à base de calcaire. Pour des températures supérieures à 40 °C, l'élévation de la température, présente un effet négatif sur les résistances de tous les BAP. Tandis que des résistances similaires entre 20 et 60 °C ont été observées pour les BAPP à 28 et 90 jours. Pour des températures allant jusqu'à 55°C, Shoukry et al. [348] ont montré aussi que la résistance (compression et traction) du béton et le module d'élasticité sont inversement proportionnelles à la température.

A travers ces diverses constatations, on peut dire que comme dans le cas de la résistance à la compression, la température optimale qui garantit la meilleure résistance à la traction pour tous 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 [252], qui a démontré que les meilleures résistances des BAP à base de calcaire, sont obtenues à 40°C. On note également de ces résultats que le BAP à base de laitier reste toujours le BAP qui développe les meilleures résistances à long termes, avec l'élévation de la température de cure.

L'effet néfaste de l'augmentation de la température sur la résistance à la traction des mortiers à 28 et 90 jours, a été aussi observé par Boubekeur [333]. Une baisse de la résistance à la flexion avec la température est observée pour tous les mélanges. L'auteur a montré aussi, que cet effet négatif est moins prononcé lorsque le ciment est substitué par une addition minérale. Tandis que, la diminution de résistance entre une cure à 20 et 50°C est de 7 ; 6 ; 5 et 4% respectivement pour un mortier à base de ciment ordinaire et ceux contenant 10 % de calcaire; 20% de pouzzolane naturelle et 30% de laitier.

### 3.5.3. Module 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 réalisée au moyen de l'essai extensométrique, en mesurant la déformation à l'âge de 28 jours d'une éprouvette cylindrique 16x32 cm sollicitée en compression simple conformément au processus d'essai [315].

### 3.5.3.1. Effet des additions minérales

Les résultats de L'effet des additions minérales sur le module d'élasticité des différents BAP à l'âge de 28 jours, en fonction de la température de cure, sont présentés à la figure 3.31.

D'après ces résultats on remarque que le module d'élasticité du BAP, est fortement influencé par la nature de l'addition minérale incorporée. A 20°C, les valeurs varient entre 35 et 42 GPa, et le module d'élasticité le plus élevé pour les quatre températures de cure, est observé dans le BAP à base de laitier. Contrairement aux BAPC et BAPP, qui ont présentés respectivement, des diminutions de 9 et 6% par rapport au BAPT à 20°C. Boukni [252], a aussi montré l'effet négatif des fillers calcaires sur l'évolution du module d'élasticité du béton autoplaçant. En outre, et d'après la littérature, la plupart des chercheurs ont trouvé une différence de 0 à 6 GPa dans le module d'élasticité des bétons à base d'additions minérales [349, 350, 351].

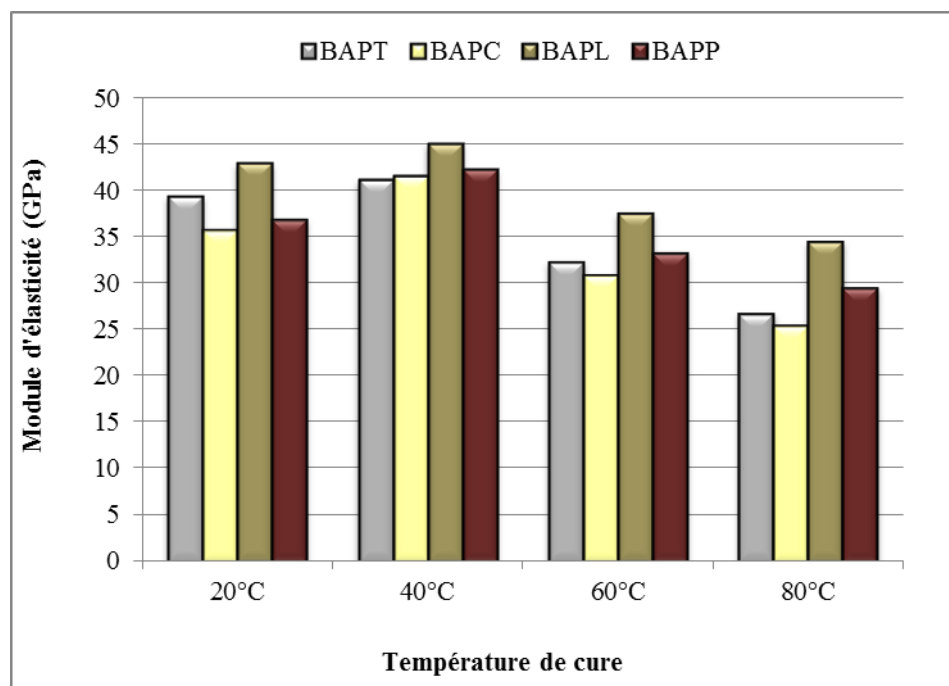


Figure 3.31 : Module d'élasticité à 28 jours des différents BAP en fonction de la température de cure.

L'élévation de la température de cure, n'entraîne pas un effet significatif sur le module d'élasticité des BAP à base de calcaire et pouzzolane. Par contre, le laitier granulé a montré une bonne efficacité avec l'augmentation de la température, des améliorations de 9 ; 10 ; 16 et 29 % sont enregistrées pour le BAPL à 20 ; 40 ; 60 et 80°C respectivement par rapport au BAPT. Avec une proportion de 50 et 75% en laitier, Sutterheim [182] et Banforth [181] ont montré un module d'élasticité similaire ou légèrement supérieur à celui du béton avec CPA de 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 légèrement plus élevé que celui du CPA [352].

### 3.5.3.2. Effet de la température de cure

Les résultats du module d'élasticité des différents BAP à différentes températures sont présentés dans la figure 3.32. On remarque que l'augmentation de la température de cure jusqu'à 40°C entraîne une amélioration du module d'élasticité pour tous les BAP par rapport à 20°C. Au-delà de 40°C, le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la température, et cela pour tous les mélanges. On peut affirmer qu'une température de cure de 40°C présente les modules d'élasticité les plus élevés pour tous les BAP, et ce en accord avec les résultats obtenus pour la résistance à la compression.

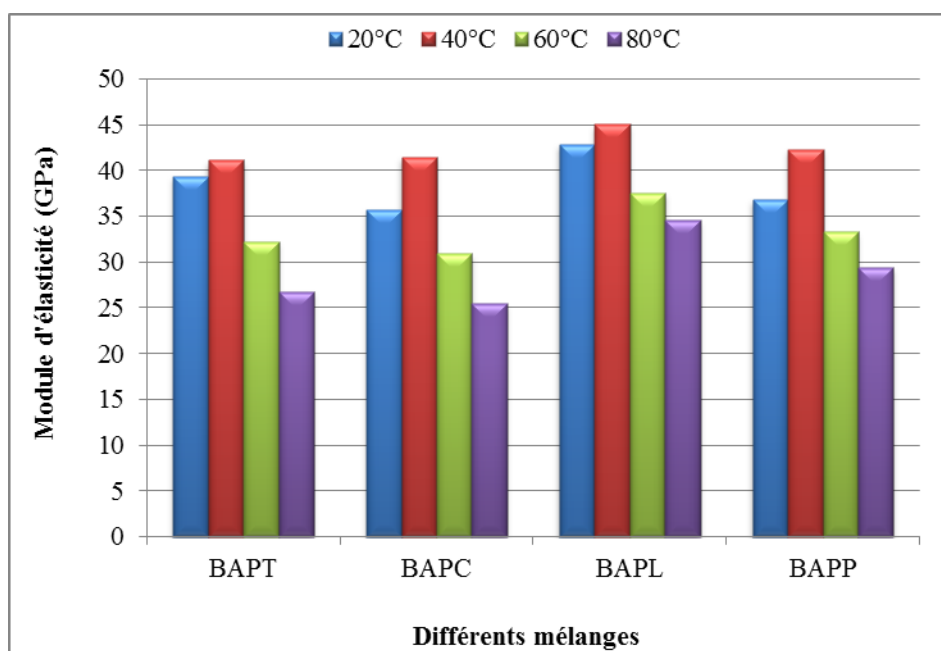


Figure 3.32 : Module d'élasticité à 28jours en fonction de type d'addition.



Il est à noter qu'il n'y a pas beaucoup de recherches sur l'effet de la température de cure sur le module d'élasticité des bétons autoplaçants. Boukni [252] a trouvé que, quel que soit la température de mûrissement, les modules d'élasticité des éprouvettes conservées à 20 °C sont toujours supérieurs à ceux des éprouvettes recevant un étuvage, et que cette diminution est plus importante lorsque la température passe de 40 à 60°C que lorsqu'il passe de 20 à 40°C. Les résultats de Reinhardt et al. [249] 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.

### 3.5.3.3. Relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression

La figure 3.33 présente la relation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité des BAP à différentes températures de cure. Selon le BAEL, le module d'élasticité du béton (E) est lié 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 BAEL avec des valeurs de K variant entre 9800 et 11500 à 20°C, 10300 et 11300 à 40°C. Au-delà de ces températures les valeurs s'éloignent de la linéaire et le coefficient K devient varie entre 8400 et 9517 à 60°C ; 6950 et 9000 à 80°C.

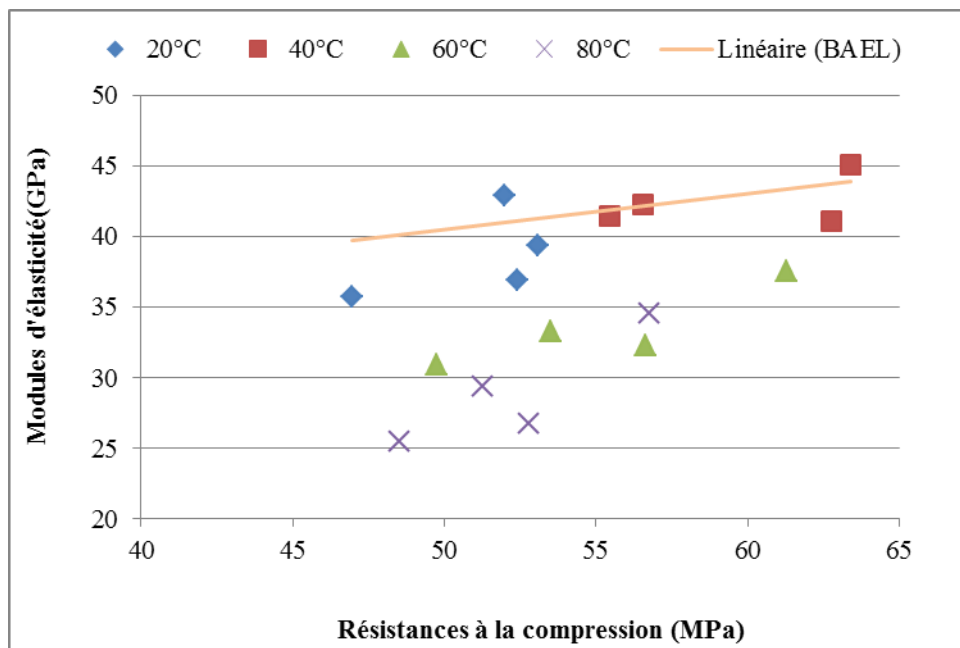


Figure 3.33 : Relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression à 28 jours.

3.5.4. Vitesse ultrasonique

Les résultats des vitesses de propagation des ondes ultrasoniques de tous les mélanges avec différentes températures de cure à 3 ; 7 ; 28 et 90 jours sont présentés dans le tableau 3.4 et figures (3.34 – 3.37). Les résultats de ces figures montrent une évolution progressive de la vitesse ultrasonique au cours du temps pour tous les BAP et quel que soit la température de durcissement, ce qui est due au développement de l'hydratation en fonction du temps. L'augmentation des vitesses, s'est ralenti après 28 jours ce qui est en corrélation avec l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

Tableau 3.4 : Vitesse ultrasonique des différents BAP à différentes températures de cure en fonction de l'âge (m/s)

Désignation	T (°C)	Age (jours)			
		3	7	28	90
BAPT	20	4090	4362	4622	4666
	40	4454	4678	4819	4878
	60	4202	4454	4816	4872
	80	4242	4640	4785	4820
BAPC	20	4036	4400	4552	4653
	40	4386	4640	4784	4805
	60	4301	4429	4728	4728
	80	4237	4561	4689	4800
BAPL	20	4098	4415	4630	4700
	40	4410	4651	4819	4901
	60	4306	4543	4835	4900
	80	4582	4657	4723	4884
BAPP	20	4107	4386	4545	4676
	40	4420	4545	4700	4825
	60	4012	4338	4690	4806
	80	4048	4510	4566	4779

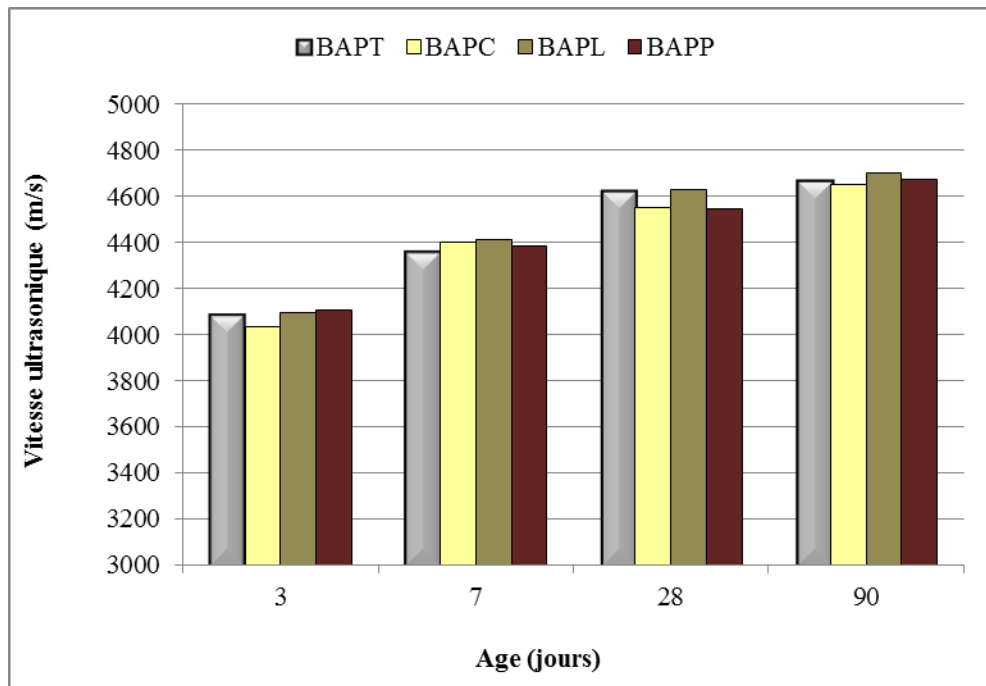


Figure 3.34 : Vitesse ultrasonique en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 20°C.

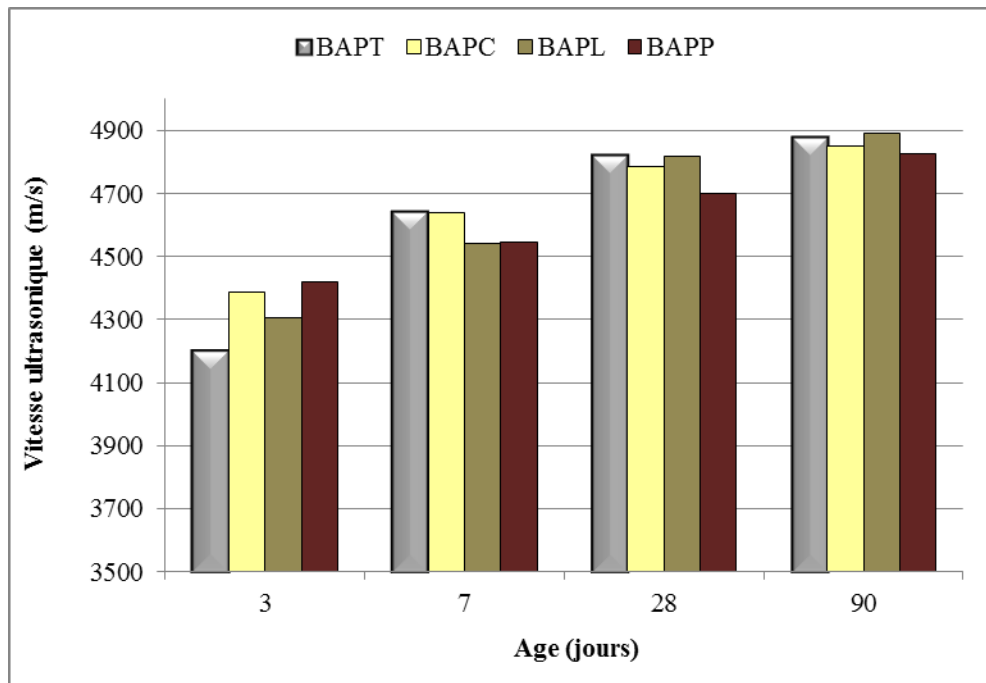


Figure 3.35 : Vitesse ultrasonique en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 40°C.

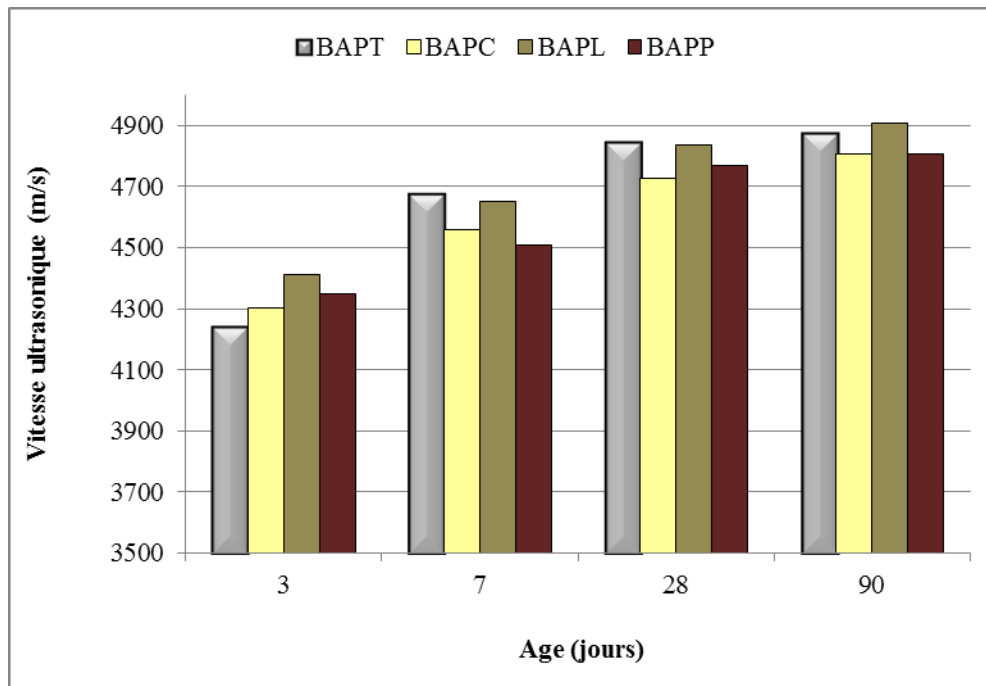


Figure 3.36 : Vitesse ultrasonique en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 60°C.

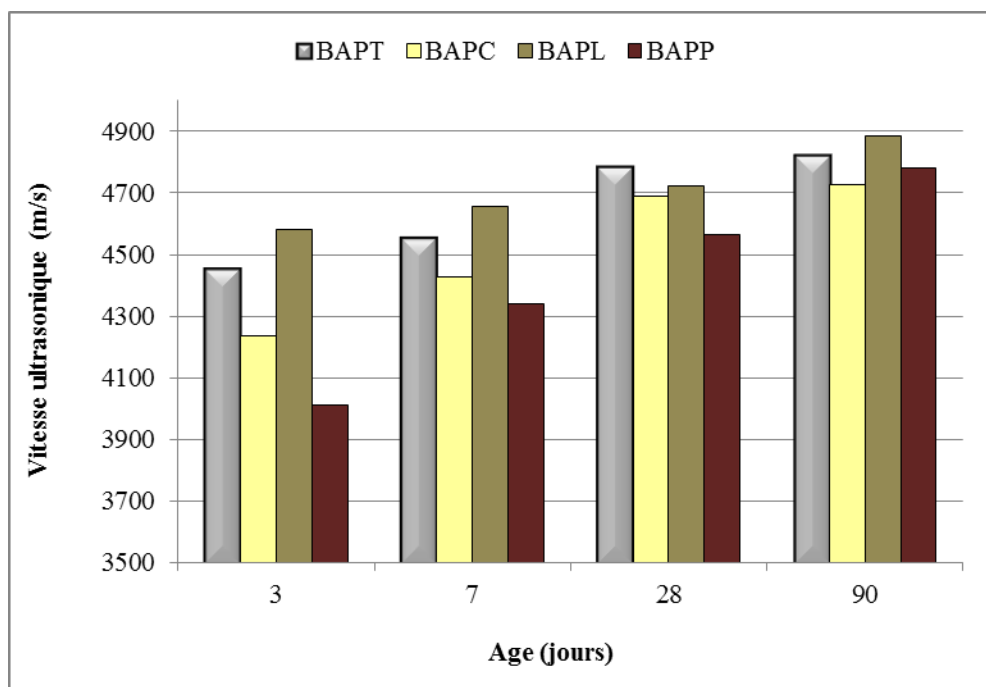


Figure 3.37 : Vitesse ultrasonique en fonction de l'âge des différents BAP conservés à 80°C.

Selon Whitehurst [352], la qualité du béton peut être déterminée selon les valeurs de sa vitesse ultrasonique comme suit :

- Vitesses de 4500 m/s et plus : qualité excellente ;
- Vitesse 3500÷4500 m/s : qualité bonne ;
- Vitesse 3000÷3500 m/s : qualité modérée ;
- Vitesse 2000÷3000 m/s : qualité mauvaise ;
- Vitesse  $\leq 2\ 000$  m/s : qualité très mauvaise.

A partir de cette classification on peut affirmer que tous les BAP réalisés dans cette étude, sont de qualité excellente.

#### 3.5.4.1. Effet des additions minérales

D'après les résultats des vitesses ultrasoniques présentés précédemment, on remarque que l'introduction du calcaire dans la formulation du BAP, fait diminuer la vitesse ultrasonique de ce dernier. En effet des vitesses inférieures à celles du BAPT sont mesurées pour les BAPC à toutes les échéances et pour les quatre températures de cure, sauf à jeune âge pour des températures de cure de 40 et 60°C. Le BAPC présente les vitesses les plus faibles par rapport aux autres BAP, ce qui montre le même comportement observé pour les résistances à la compression, et coïncide avec ce trouvé pour une incorporation de 20% de calcaire [353].

Des vitesses comparables à celles du BAPT, sont mesurées à 20°C, pour le BAPP pour toutes les échéances d'essai. Au-delà de 20°C et jusqu'à 60°C, l'augmentation de la température, engendre une amélioration dans les vitesses du BAPP à 3 jours. Et qui s'inverse à partir de 7 jours, où une diminution est observée pour tous les âges par rapport au BAPT. L'effet négatif de la température de 80°C est aussi observé dans les vitesses ultrasoniques du BAPP pour toutes les échéances d'âge comme pour le cas de la résistance à la compression de ce dernier. En ce qui concerne le BAPL, des valeurs comparables à celles du BAPT avec une légère augmentation des vitesses ultrasoniques sont constatées après 28 jours, et pour 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. De même, et pour des taux de 10 à 20% de laitier, Guneyisi et Gesoglu [54] ; Mucteba et Mansur [353] et Turkmen et al. [354] ont remarqué que la vitesse des BAPL est supérieure à celle du BAP de référence à partir de 28 jours.

#### 3.5.4.2. Effet de la température de cure

L'augmentation de la température provoque une augmentation de la vitesse ultrasonique à jeune âge, sauf pour le BAPP qui a révélé à jeune âge des valeurs à 60°C et 80°C inférieures à celles du même béton à 20°C. Mais après 7 jours, et ou delà de 40°C, l'élévation de la température, engendre une diminution dans les vitesses ultrasoniques. Il est à noter que les plus grandes vitesses de propagation des ondes sont mesurées sur les échantillons conservés à 40°C pour tous les âges d'essai, ce qui est en corrélation avec l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

Contrairement au béton autoplaçant, pour les bétons ordinaires, Abbasi [355] 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. Il est à signaler que peu de recherches sont faites sur l'effet de la température de cure sur la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques pour les bétons autoplaçants. Gesoğlu [251] a montré que les bétons qui ont subi un traitement thermique de 1 jour, avaient des valeurs de vitesses ultrasoniques 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 des vitesses de ces derniers.

#### 3.5.4.3. Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression

Il est à noter que la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques permet d'évaluer non seulement la qualité du béton (homogénéité, la présence des fissures et vides), mais aussi de déterminer la résistance à la compression d'une structure existante et des éléments préfabriqués sans avoir recours à des essais qui peuvent affaiblir l'élément en béton tel que le carottage. La résistance peut être estimée à partir de la vitesse d'impulsion par une corrélation empirique ou bien graphique préétablie entre les deux caractéristiques. Les résultats des vitesses ultrasoniques pour tous les BAP sont corrélés avec leurs résistances à la compression correspondantes en fonction de type d'addition minérale et de la température de cure selon les modèles proposés dans les figures 3.38 et 3.39 respectivement.

La figure 3.38 et les équations (3.1 - 3.4), présentent les différents modèles de corrélation proposés entre la résistance à la compression par écrasement des éprouvettes et la vitesse ultrasonique correspondante pour les différents BAP.

$$f_c = 1,0802 e^{0,8331V} ; (R^2 = 0,8181) \text{ pour BAPT} \quad (3.1)$$

$$f_c = 0,7047 e^{0,9161V} ; (R^2 = 0,7212) \text{ pour BAPC} \quad (3.2)$$

$$f_c = 0,2078 e^{1,1879V} ; (R^2 = 0,8494) \text{ pour BAPL} \quad (3.3)$$

$$f_c = 1,4197 e^{0,7751V} ; (R^2 = 0,6876) \text{ pour BAPP} \quad (3.4)$$

Avec :

$f_c$  : résistance à la compression en MPa ;

$V$  : vitesse ultrasonique en km/s ;

$R^2$  : coefficient de corrélation.

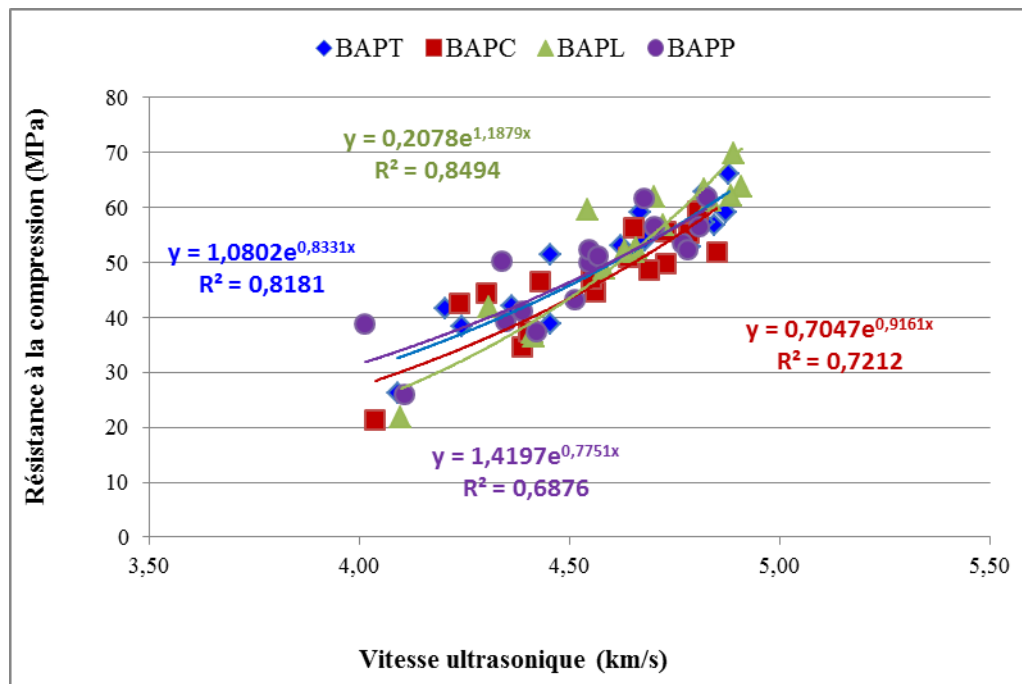


Figure 3.38 : Corrélation entre les résistances à la compression et les vitesses ultrasoniques des différents BAP en fonction de type d'addition.

D'après les courbes de la figure 3.38 et les équations (3.1 – 3.4), on constate que l'ensemble des BAP (avec et sans additions) présente une corrélation acceptable entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression (des coefficients de corrélation entre 0,69 et 0,85). En outre, toutes les équations, ont la forme exponentielle avec des constantes

différentes, ce qui est en accord avec les travaux de Tharmaratnam et Tan [356] ; Ulucan et al. [357] ; Demirboğa et al. [358] et Boukhelkhal [91] sur les bétons à base des additions minérales. On remarque aussi que la meilleure corrélation a été trouvée pour les BAPL ( $R^2 = 0,8494$ ), contrairement au BAPP, qui a la plus faible corrélation ( $R^2 = 0,6876$ ) par rapport au BAPT.

Les différents modèles de corrélation proposés entre la résistance à la compression par écrasement des éprouvettes et la vitesse ultrasonique correspondante pour les différentes températures de cure, sont présentés sur la figure 3.39 et les équations (3.5 – 3.8).

$$f_c = 0,0463 e^{1,5306V} ; (R^2 = 0,9645) \text{ pour } 20^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

$$f_c = 0,1545 e^{1,2461V} ; (R^2 = 0,9611) \text{ pour } 40^\circ\text{C} \quad (3.6)$$

$$f_c = 5,6001 e^{0,4852V} ; (R^2 = 0,8044) \text{ pour } 60^\circ\text{C} \quad (3.7)$$

$$f_c = 3,0421 e^{0,6026V} ; (R^2 = 0,8089) \text{ pour } 80^\circ\text{C} \quad (3.8)$$

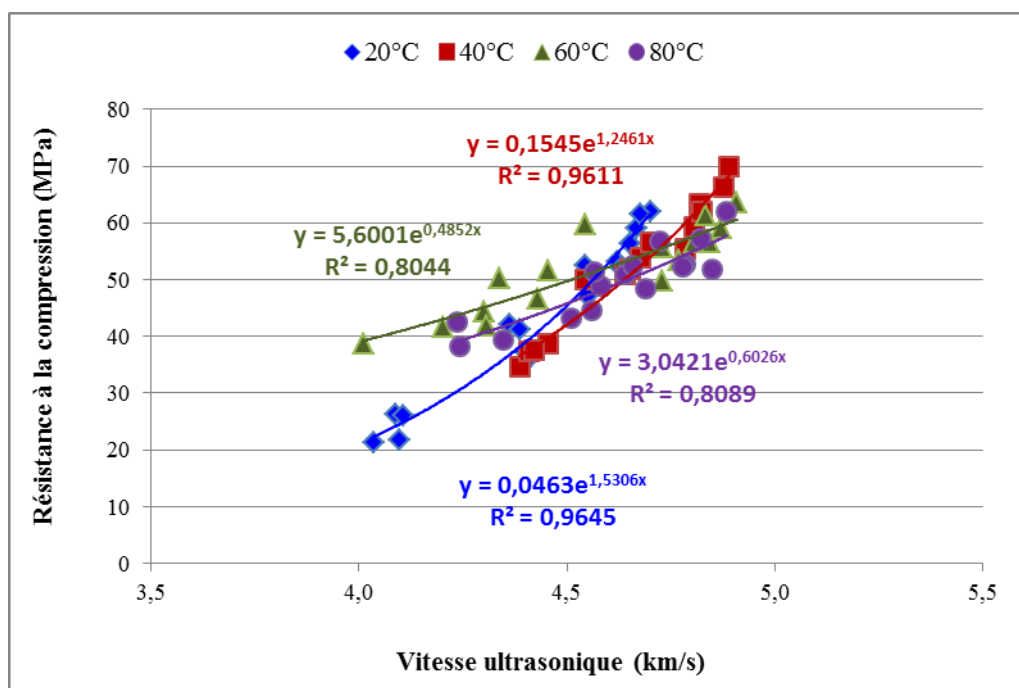


Figure 3.39 : Corrélation entre les résistances à la compression et les vitesses ultrasoniques des différents BAP en fonction de la température de cure.



On remarque de la figure 3.39, que même avec l'augmentation de la température de murissement du BAP, des bonnes relations de corrélation entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression correspondante ont été trouvées, avec des coefficients de corrélation compris entre 0,80 et 0,96. En outre, toutes les corrélations proposées ont des relations de forme exponentielle avec des constantes différentes.

On remarque en plus, qu'à 20 et 40°C le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,9 et qui diminue à 0,8 pour 60 et 80°C, donc une température plus de 40°C peut affaiblir cette corrélation. Des résultats comparables ont été trouvés par Derabla et Larbi [127], ces auteurs ont trouvé des faibles corrélations entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression des BAP traités thermiquement (sous 60°C), par rapport aux BAP muris dans les conditions normales ce qui est dû au degré de porosité élevé existant. En effet, la porosité est élevée pour les BAP traités thermiquement et par conséquent il affecte la propagation des ondes ultrasoniques à travers la structure du matériau.

### 3.5.5 Synthèse des résultats des caractéristiques mécaniques

À la lumière des résultats obtenus au cours de cette partie d'étude, plusieurs conclusions peuvent être faits.

- L'effet néfaste de la diminution de la quantité de ciment ne peut être compenser par l'addition calcaire quel que soit la température de cure. En effet, le calcaire a réduit tous les performances mécaniques étudiées. Sauf une accélération d'hydratation du BAPC est révélée à 60 et 80°C pour avoir des résistances similaire à celle du BAP sans additions, donc on note que l'utilisation de l'addition calcaire ne peut être justifié que par des considérations économiques et écologiques particulières ;
- La réactivité lente du laitier qui lui donne un effet d'un retardateur de prise peut être éliminer par une augmentation de la température de cure. L'efficacité de ce dernier 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 compression et traction, vitesse de propagation et le module d'élasticité à toutes les températures de cure ;

- Le Laitier est l'addition la plus efficace à des températures de cure élevées, contrairement à la pouzzolane naturelle qui est la meilleure addition pour substituer le ciment à 20°C, mais la plus affectée 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 à 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 jugée optimale pour tous les BAP pour les raisons suivantes :
  - Une augmentation importante de la résistance à la compression à jeune âge sans la nuire à long terme, et ceci jusqu'à 90 jours ;
  - Les meilleures résistances à la traction à long terme sont observées à cette température ;
  - Une augmentation du module d'élasticité à 28 jours, et la vitesse de propagation des ondes à tous les échéances.

### 3.6. Effet des additions minérales et de la température de cure sur les propriétés de transfert

La plupart des processus de détérioration touchants les structures en béton, impliquent les transferts de matière (en particulier d'agents agressifs) à l'intérieur de ces matériaux poreux. Il est couramment prétendu que meilleure est la résistance d'un béton à ces transferts, plus durable sera celui-ci. La pénétration de gaz, d'eau ou d'autres fluides dans le béton s'effectue par l'intermédiaire des pores de la matrice cimentaire et des interfaces pâte - granulats. Les BAP sont connus par leur structure dense ce qui les qualifie de matériaux plus résistants par rapport aux bétons ordinaires envers des phénomènes affectant la durabilité.

Afin d'apprécier l'impact d'une température de cure élevée sur les propriétés de durabilité des BAP incorporants ou non des additions minérales, des mesures des indicateurs de durabilité généraux sont réalisées à l'âge de 28 jours sur l'ensemble des bétons autoplacants élaborés dans cette étude. Deux propriétés de transfert à savoir la porosité accessible à l'eau (porosité ouverte) qui traduit le volume poreux du matériau, ainsi, l'absorption d'eau par capillarité, qui donne une image de la taille des pores capillaire ont été étudiées.

### 3.6.1. Porosité accessible à l'eau

La durabilité des bétons dépend beaucoup de leur porosité, cette dernière traduit le volume des vides ouvert sur le volume total du béton. Cette grandeur informe sur la capacité du matériau à se laisser pénétrer par des agents agressifs (porosité ouverte).

#### 3.6.1.1. Effet des additions minérales

Les valeurs de la porosité accessible à l'eau en fonction du type d'addition minérale pour les différentes températures de cure, sont présentées à la figure 3.40. Dans les conditions normales (20°C), les résultats de cette figure, montrent l'effet important des additions minérales sur la porosité des BAP. En effet, le laitier granulé et la pouzzolane naturelle par leur activité hydraulique et pouzzolanique rendent le BAP moins poreux, par conséquent, des réductions de 6 et 1% ont été observées pour le BAPL et BAPP respectivement par rapport au BAPT confirmant les résultats de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours. Par contre, le BAP à base de calcaire, présente une augmentation de 18% par rapport au BAPT. Derabla et Larbi [127] ont montré que l'incorporation de 20% du laitier granulé, provoque une réduction de 40% dans la porosité du BAP. Boucetta [167] a également trouvé que les BAP contenant du laitier granulé, sont moins poreux que ceux avec des fillers calcaire.

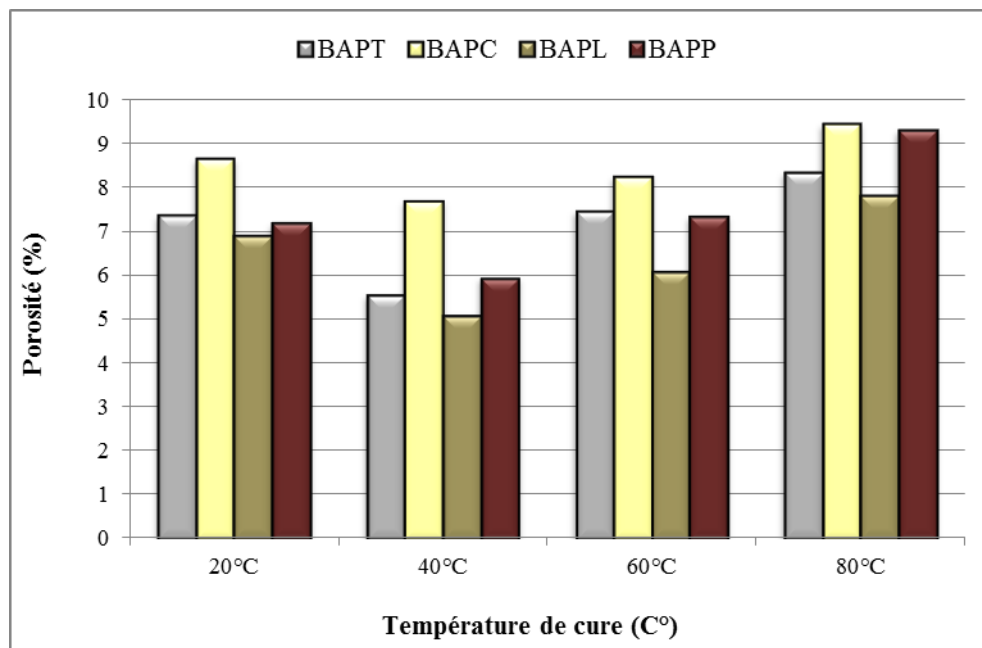


Figure 3.40 : Porosité accessible à l'eau à 28 jours en fonction de type d'addition.

L'élévation de la température de cure, entraîne une augmentation dans la porosité des BAPC pour toutes les températures. En effet, l'augmentation de la porosité par rapport au BAPT à une même température est de 18 ; 30 ; 16 et 13% à 20 ; 40 ; 60 et 80°C, respectivement et la plus faible différence a été observée à 60°C. Alors, ces BAP présentent, les bétons les plus poreux comparativement aux autres bétons et cela pour toutes les températures de cures. En outre, une augmentation de la porosité par rapport au BAPT est aussi observée par le BAPP pour des températures supérieures à 40°C. Contrairement, les BAP contenant du laitier granulé présentent les BAP les moins poreux pour toutes les températures de murissement, où, une réduction de 6 ; 15 ; 17 et 7% est observée par rapport au BAPT à 20 ; 40 ; 60 et 80°C respectivement. Ce qui confirme les résultats de la résistance à la compression, et qui peut-être dû à la production de d'autres hydrates (CSH) qui combinent les vides et améliorent la microstructure.

L'effet des additions minérales sur la porosité des BAP traités thermiquement, a été aussi étudié par Derabla et Larbi [127]. Ces auteurs ont montré que l'élévation de la température à 60°C, fait augmenter la porosité des BAP incorporant du calcaire ou laitier à raison de 20% du poids de ciment. Les auteurs ont trouvé également que l'augmentation du dosage en addition, engendre une augmentation dans la porosité des BAP à 60°C. Ho et Cao [259] ont rapporté que l'addition de 20% de cendres volantes, engendre une diminution dans la porosité du béton traité thermiquement, par rapport au même béton mûri à 20°C. En outre, Ho et al. [359] ont trouvé des résultats similaires pour des bétons contenant 35% du laitier de hauts fourneaux. Selon Neville [63], la présence des additions minérales empêche la formation de produits avec la structure ouverte dans le béton qui est soumis à la haute température.

#### 3.6.1.2. Effet de la température de cure

Les résultats de la porosité accessible à l'eau en fonction de la température de cure pour tous les BAP à l'âge de 28 jours sont présentés sur la figure 3.41. On remarque que l'augmentation de la température à 40°C provoque une diminution dans la porosité du BAP et ceci quel que soit le type d'addition employée. En effet, et pour tous les BAP étudiés, les plus faibles porosités sont observées sous cette température. Une diminution de 25 ; 11 ; 26 et 17% est enregistrée pour le BAPT, BAPC, BAPL et BAPP à 40°C respectivement par rapport aux mêmes BAP conservés à 20°C.

Mouret et al. [257] ont montré qu'une cure de 5 heures sous une température de 35°C, n'induit pas une augmentation de la porosité accessible à l'eau du béton à 28 jours. Et ceci quelle que soit la classe de résistance étudiée (22 et 35 MPa) et la nature granulaire (siliceux ou calcaire poreux).

En outre, une température de cure de 60°C, n'affecte pas significativement la porosité de tous les BAP, où des valeurs comparables dans la porosité des BAP pour un 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. Alors, en ajoutant du laitier granulé au béton autoplaçant, on peut avoir une bonne durabilité et meilleures performances de ce dernier sous une température allant jusqu'à 60°C. Vinh-An [229], a montré aussi qu'une maturation sous température de 35°C des BAP à base de laitier granulé, ne semble pas affecter significativement cet indicateur de durabilité.

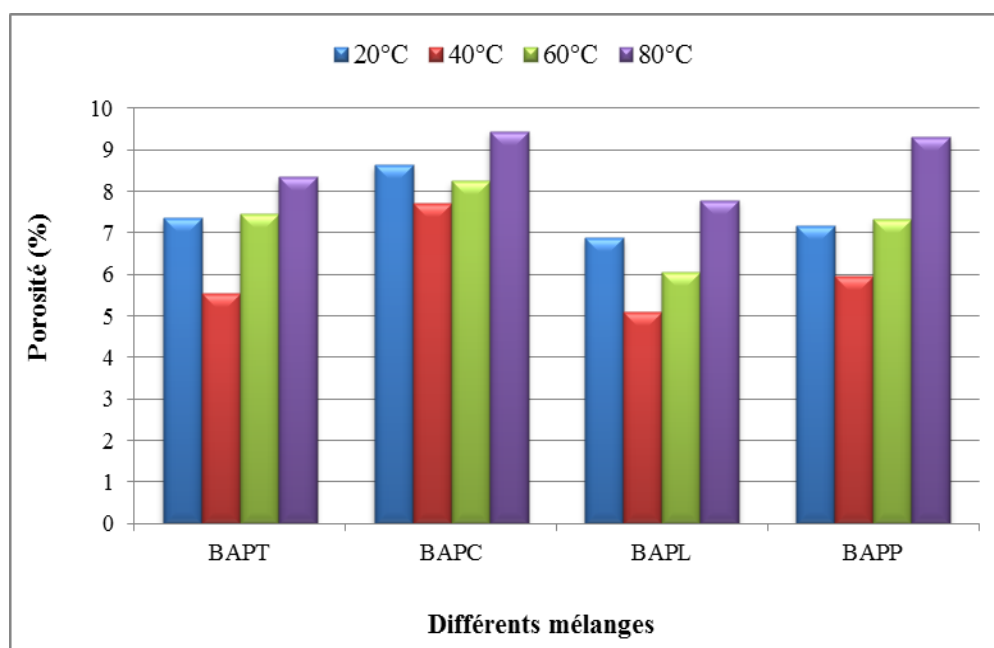


Figure 3.41 : Porosité accessible à l'eau à 28 jours en fonction de type d'addition minérale.

Au-delà de 60°C, la porosité augmente avec l'augmentation de la température de durcissement, de sorte que les valeurs les plus élevées sont mesurées à 80°C pour tous les mélanges. Une augmentation de 13 ; 9 ; 13 et 30% a été observée pour le BAPT ; BAPC ; BAPL et BAPP conservés à 80°C, par rapport aux mêmes BAP conservés dans les conditions normales (20°C).

Reinhardt et Stegmaier [249], ont constaté que l'élévation de la température de cure 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  $0,1\mu\text{m}$ ). Gallucci et al. [258] ont confirmé aussi que l'augmentation de la température agit sur la répartition des hydrates plutôt que sur leur quantité.

### 3.6.1.3. 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 3.42 montre la courbe reliant les valeurs de la porosité accessible à l'eau des différents BAP et leurs valeurs de résistance en compression à 28 jours en fonction des températures de cure. On peut observer que la résistance à la compression dépend fortement de la porosité du béton causée par l'augmentation de la température de mûrissement de ces derniers. En effet, une bonne corrélation est observée entre les deux grandeurs ( $R^2 = 0,75$ ), ce qui confirme la tendance évoquée par plusieurs auteurs [26, 120, 167].

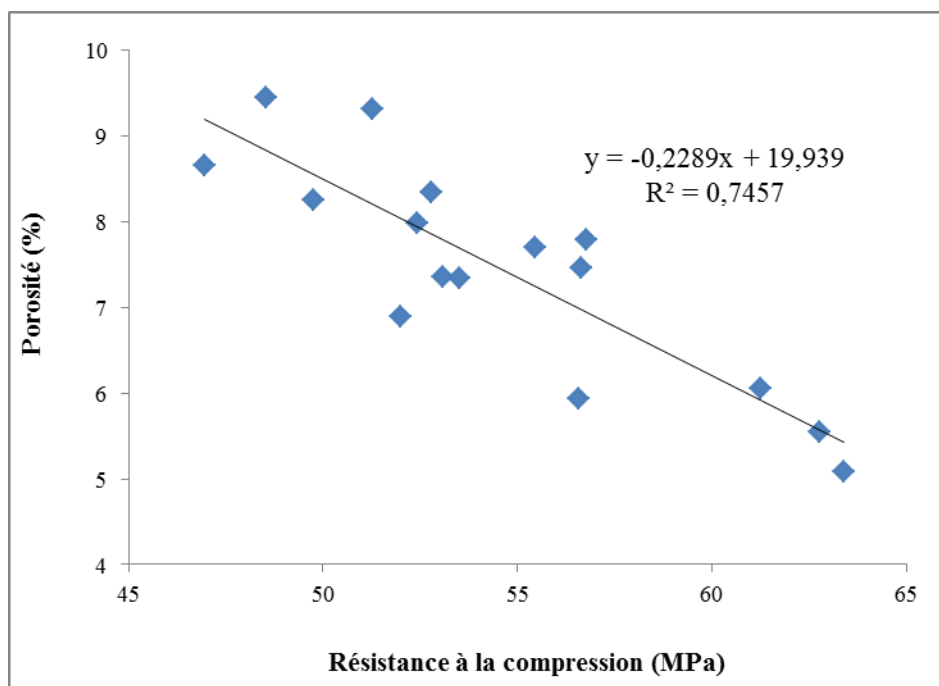


Figure 3.42 : Relation entre la porosité ouverte et la résistance en compression de tous les BAP mesurés à 28 jours.

3.6.2. Absorption d'eau par capillarité

L'absorption d'eau traduit la capacité d'un béton à se faire pénétrer par l'eau durant une phase d'immersion totale. Cette grandeur est le seul indicateur de durabilité utilisé pour l'approche prescriptive de la formulation des bétons, et qui nous renseigne sur la taille et grosseur des différents pores.

Cette caractéristique est souvent traduite par deux paramètres, le coefficient d'absorption qui 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 faibles. 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. Selon Mouret et al. [257], la température de mûrissement élevée aux jeunes âges ne modifie pas l'absorption initiale (première heure d'absorption) des bétons à l'âge de 28 jours, mais une augmentation de leur absorptivité évaluée entre 1 heure et 24 heures d'absorption est observée.

Les résultats de l'absorption capillaire à 24 heures et ceux de la sorptivité de tous les BAP à 28 jours d'âge en fonction de la température de cure sont reportés dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5 : 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 <sup>2</sup> )	1,91	1,08	1,55	2,18
	S (m/h <sup>0,5</sup> )	0,32	0,15	0,25	0,37
BAPC	Ca (kg/m <sup>2</sup> )	2,47	1,83	2,32	2,85
	S (m/h <sup>0,5</sup> )	0,44	0,34	0,41	0,48
BAPL	Ca (kg/m <sup>2</sup> )	1,46	0,80	1,16	1,98
	S (m/h <sup>0,5</sup> )	0,24	0,15	0,19	0,34
BAPP	Ca (kg/m <sup>2</sup> )	1,66	1,41	1,83	2,50
	S (m/h <sup>0,5</sup> )	0,28	0,24	0,31	0,42

3.6.2.1. Effet des additions minérales

Les figures (3.43 - 3.46), présentent les résultats de la mesure des coefficients d'absorption capillaire (Ca) obtenus par application de l'équation (2.16) décrite au chapitre 2 en fonction de la racine carrée du temps des différents BAP à 28 jours, et pour les différentes températures de cure. On constate que le coefficient d'absorption (Ca) aux différentes échéances de tous les BAP et pour toutes les températures de cure, augmente avec la racine carrée du temps, en suivant une succession de segments linéaires caractérisés par une diminution de pentes avec le temps. D'après Bessa [69], la régression des pentes est assimilée à l'existence de plusieurs familles de pores, plus la pente de la droite est élevée, plus les pores sont plus gros. En effet, dès que la remontée capillaire est accomplie dans les plus gros pores capillaires au bout d'un certain temps, l'absorption se poursuit dans les pores de plus en plus fins et de ce fait, la cinétique d'absorption de ces bétons est ralentie, ce qui explique la diminution de la pente.

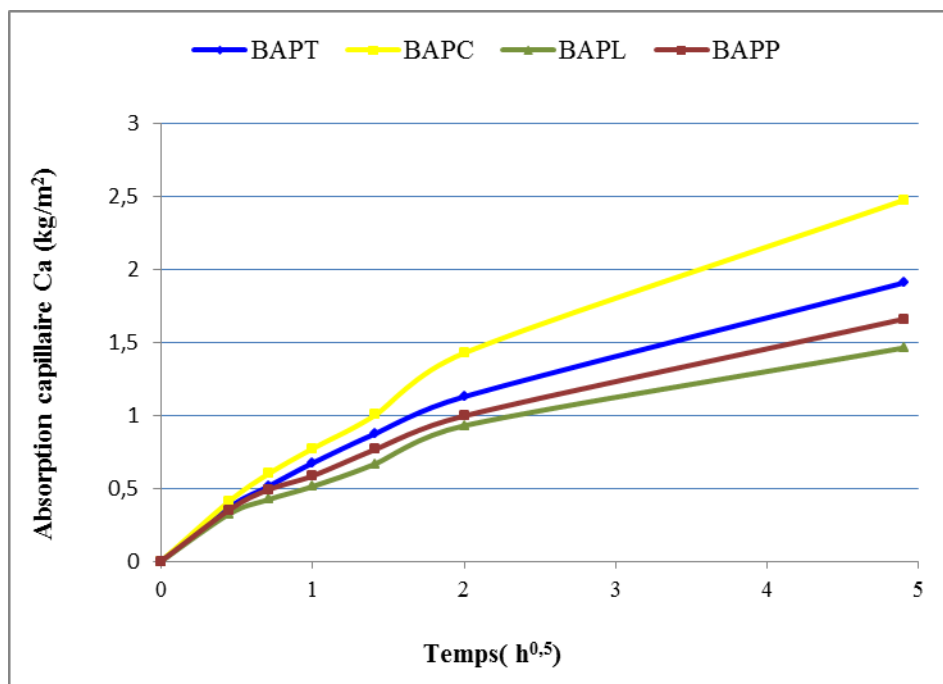


Figure 3.43 : Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours des différents BAP conservés à 20°C.



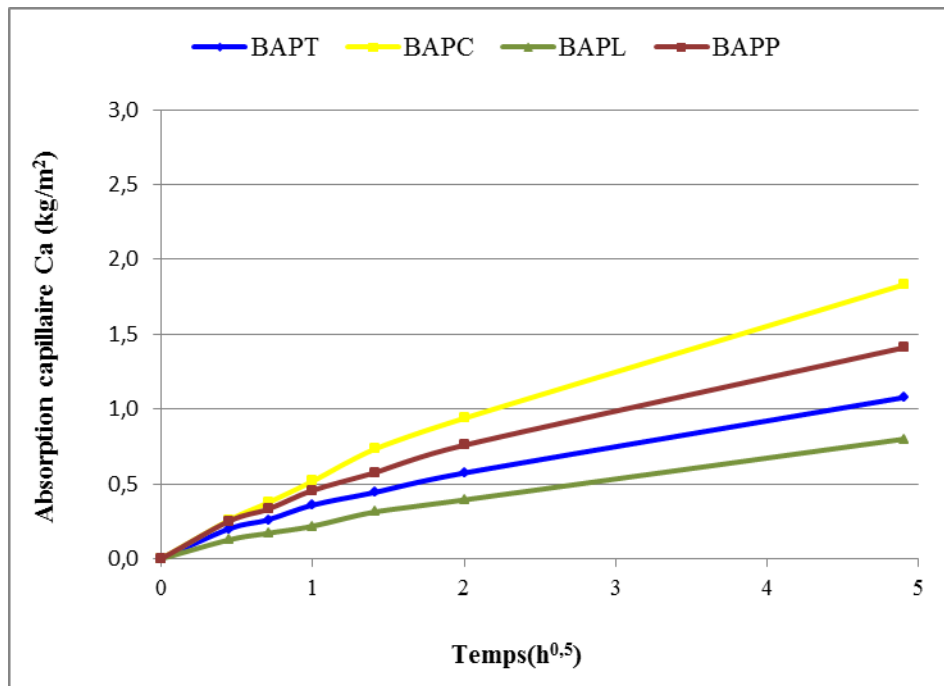


Figure 3.44 : Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours des différents BAP conservés à 40°C.

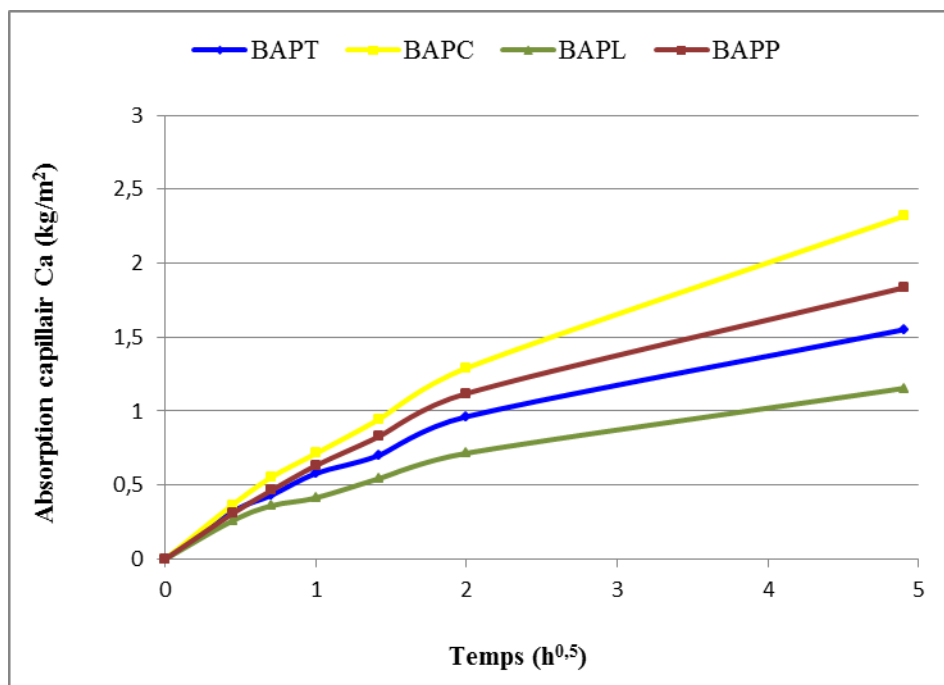


Figure 3.45 : Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours des différents BAP conservés à 60°C.

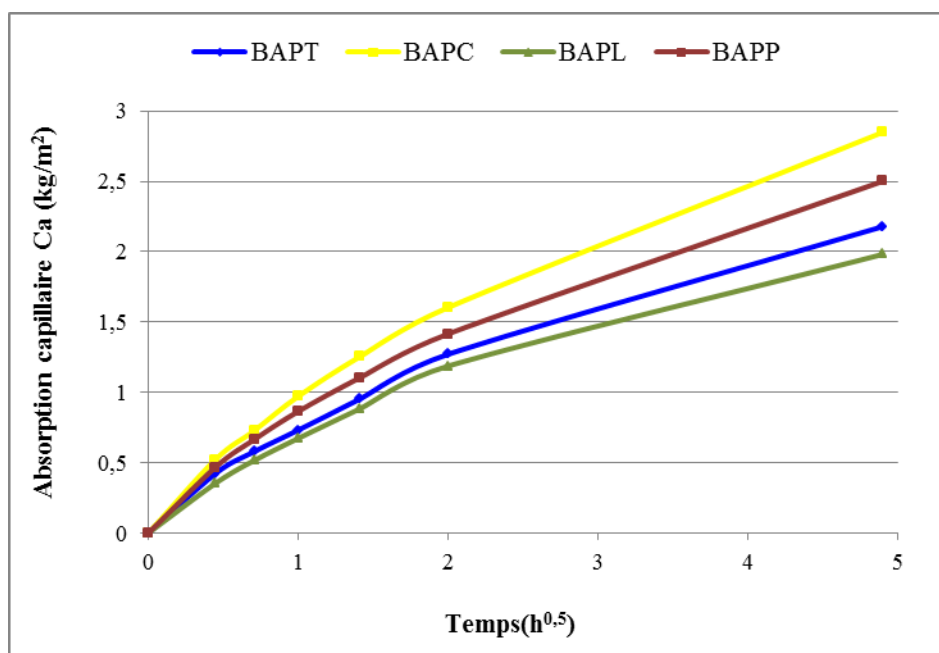


Figure 3.46 : Absorption d'eau par capillarité à l'âge de 28 jours des différents BAP conservés à 80°C.

Les figures (3.43 – 3.46), montrent aussi pour toutes les températures de cure, les BAP à base de calcaire sont les mélanges avec l'absorption capillaire la plus élevée, tandis que les BAP à base de laitier granulé sont les plus performants. Concernant la pouzzolane naturelle, on remarque une amélioration de la compacité du mélange muri à 20°C, ce qui se traduit par une baisse d'absorption capillaire du BAPP par rapport au BAP témoin à cette température. Mais à partir de 40°C, ces derniers (BAPP), devient plus absorbants que le BAPT, avec l'augmentation de la température à plus de 20°C.

L'étude de la sorptivité (S) déterminée entre 1 heure et 8 heures par l'équation (2.17) présentée au chapitre 2, est nécessaire pour avoir une idée sur la vitesse d'absorption et même sur la taille des pores. D'après Bessa [67], plus la pente de la droite est élevée, plus les pores sont plus gros, 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 cure, est présentée à la figure 3.47. A l'issu de ces résultats, on remarque que la vitesse d'absorption des BAP à base de filler calcaire est nettement supérieure à celle des BAP à base de laitier ou de pouzzolane et celle du BAPT. En effet, une augmentation de 38 ; 83 ; 65 et 30% en sorptivité, est observée entre le BAPC et BAPT à 20 ; 40 ; 60 et 80°C, respectivement.

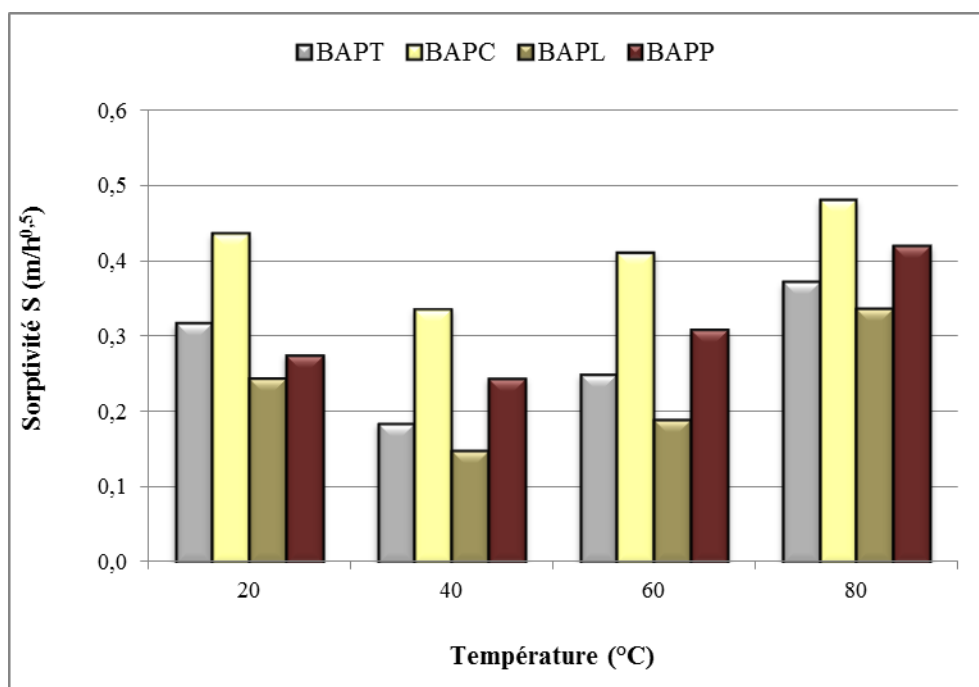


Figure 3.47 : Sorptivité des différents BAP à l'âge de 28 jours en fonction de la température de cure.

L'activité hydraulique du laitier et pouzzolanique de la pouzzolane favorise le ralentissement de la vitesse d'absorption des BAP et réduit significativement leur sorptivité par l'amélioration de la structure poreuse, en tapissant la surface des pores capillaires par les C-S-H produits lors des réactions chimiques de ces additions. En effet, une réduction de sorptivité des BAPL et BAPP par rapport au BAPT est observée à 20°C, ce que confirme les résultats trouvés par Boucetta [167].

Pour des températures supérieures à 20°C, et comme pour la porosité accessible à l'eau, les BAP à base de laitier granulé ont développé les meilleures performances comparativement aux autres BAP vis à vis leurs sorptivités. En effet, une diminution de l'ordre de 23 ; 19 ; 24 et 10% par rapport au BAPT a été remarqué à 20, 40, 60 et 80°C, respectivement. En outre, les BAPL présentent une structure plus dense à celle d'un BAPT conservé à 20°C. Par contre, l'effet pouzzolanique de la pouzzolane naturelle, n'a pas compensé l'effet négatif des hautes températures. En effet, une augmentation de 33 ; 24 et 13 % a été observée dans la sorptivité des BAPP par rapport au BAPT à 40, 60 et 80°C, respectivement.

L'effet des additions minérales sur la durabilité des bétons sous des températures élevées a été analysé par Ho et al. [359], qui ont étudié l'effet des cendres volantes, laitier granulé et fumée de silice sur le comportement d'un béton mûri à 55°C. Il ont conclu que les bétons mûris à 55°C, sont plus poreux à ceux conservés à 27°C et que l'incorporation du laitier et fumée de silice améliore les performances du béton sous températures élevées en terme de résistance et sportivité. Les mêmes conclusions ont été apportées par Gesoğlu [251] sur l'effet de fumées de silice et métakaolin sur la sorptivité des BAP traités à 70°C.

### 3.6.2.2. Effet de la température de cure

Les résultats de la mesure des coefficients d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps et la température de cure des BAPT, BAPC, BAPL et BAPP à 28 jours d'âge, sont présentés aux figures (3.48 - 3.51).

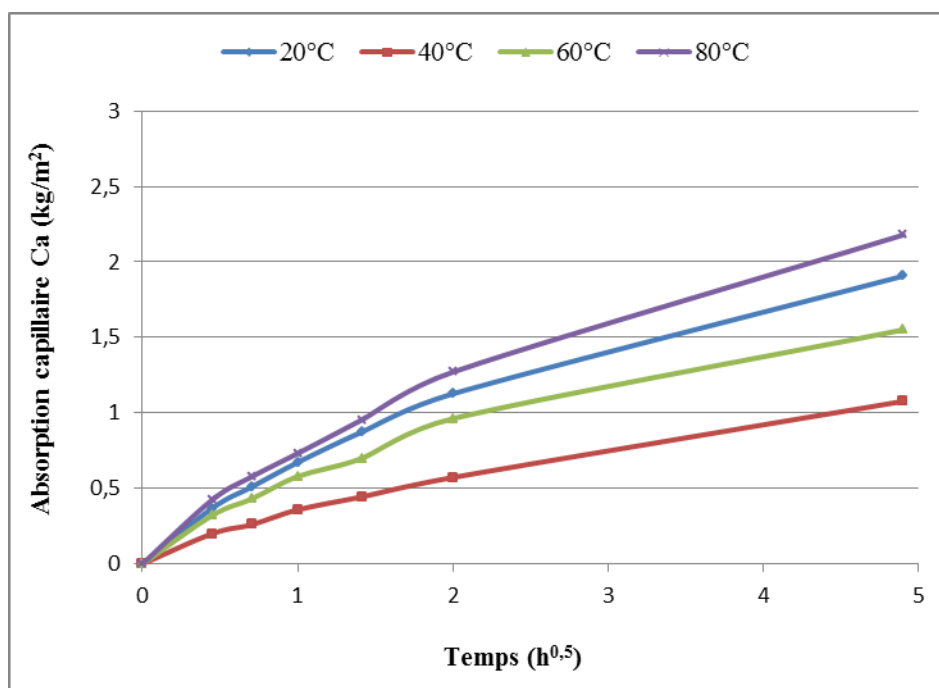


Figure 3.48 : Absorption d'eau par capillarité du BAPT à l'âge de 28 jours en fonction de la température de cure.

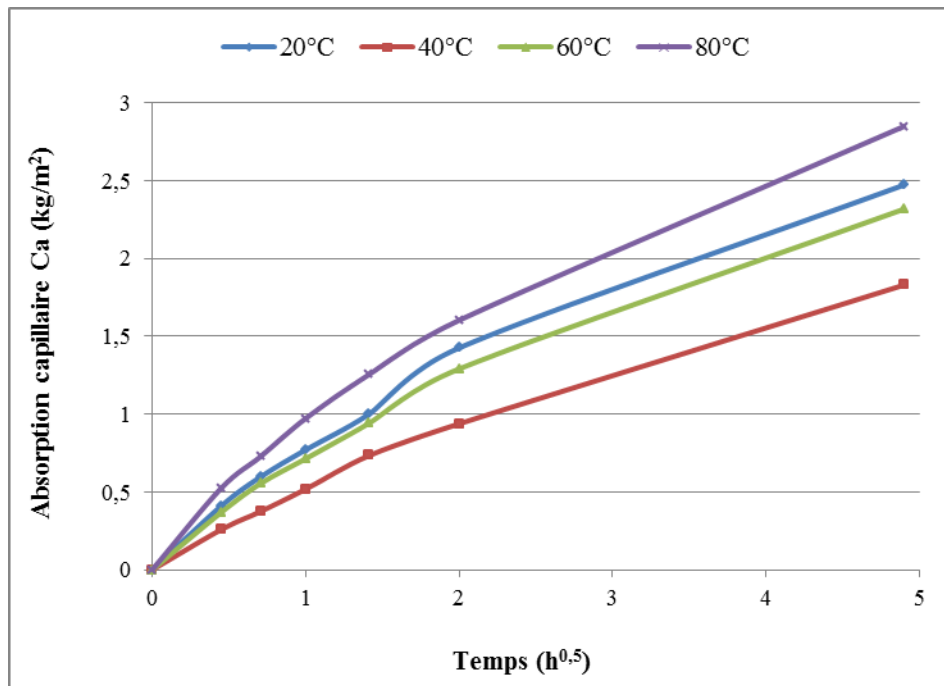


Figure 3.49 : Absorption d'eau par capillarité du BAPC à l'âge de 28 jours en fonction de la température de cure.

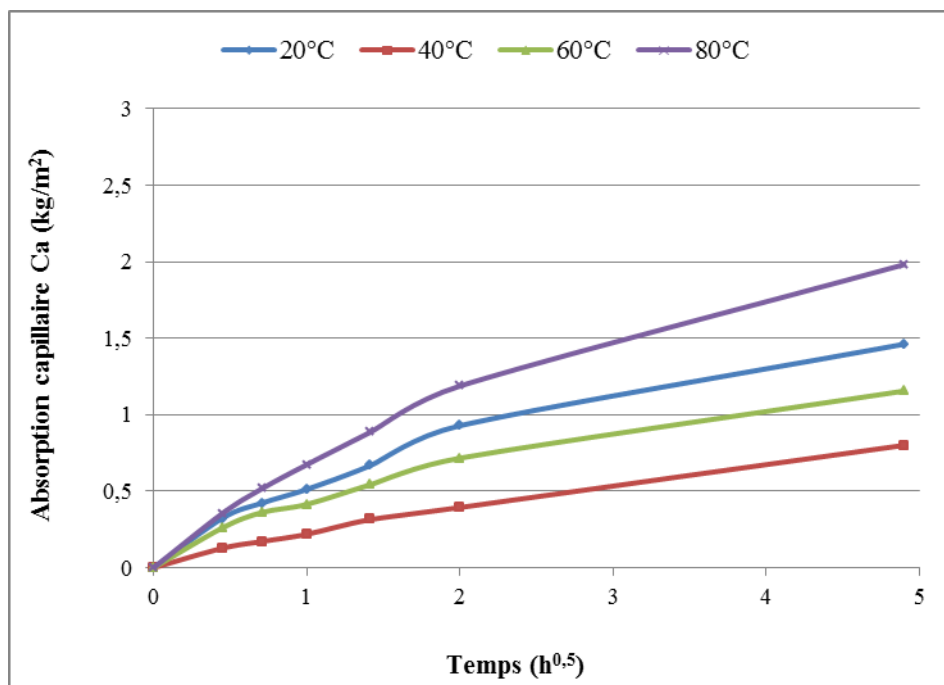


Figure 3.50 : Absorption d'eau par capillarité du BAPL à l'âge de 28 jours en fonction de la température de cure.

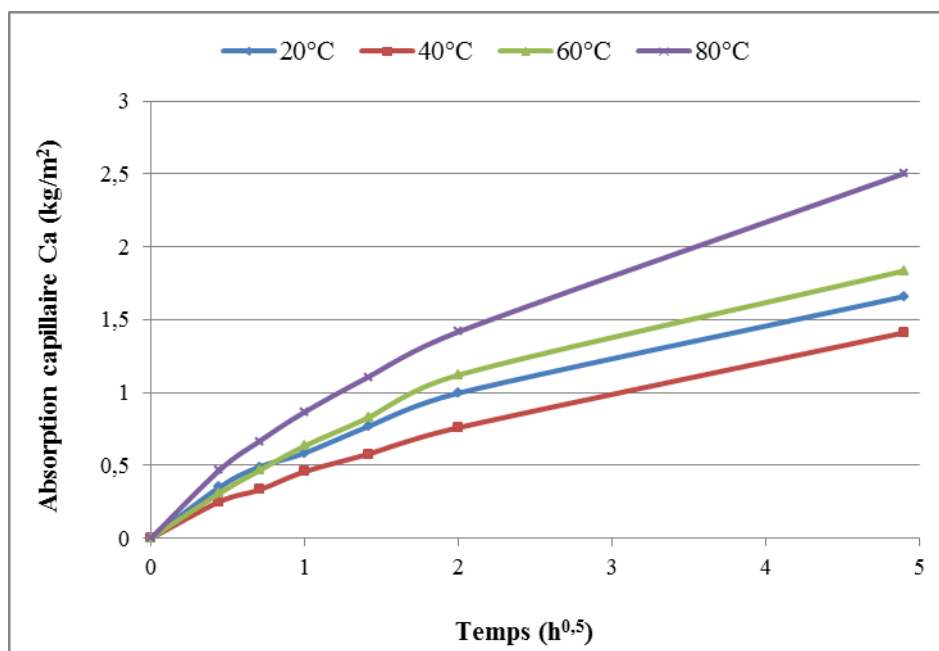


Figure 3.51 : Absorption d'eau par capillarité du BAPP à l'âge de 28 jours en fonction de la température de cure.

D'après les résultats des figures (3.48 - 3.51), on observe clairement, que quel que soit le type d'addition employée, les BAP conservés à 40°C sont les mélanges les moins absorbants par rapport aux autres températures. Ceci est traduit par la meilleure densification de tous les BAP à cette température et confirme les résultats de la porosité ouverte et ceux des caractéristiques mécaniques des différents BAP à la même température. 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 inférieure à celle de 20°C pour les BAPT, BAPC et BAPL. Il est à noter que les valeurs d'absorption les plus élevées sont constatées à 80°C et pour tous les BAP.

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 3.52. On remarque que les plus faibles sorptivités sont enregistrées pour le cas de murissement à 40°C pour tous les BAP étudiés. Il est à noter aussi qu'au-delà de cette température, la sorptivité de tous les mélanges augmente, plus en augmentant la température de cure. Cependant, la sorptivité des BAP à 60°C reste inférieure à celle des mêmes BAP à 20°C sauf pour les BAP à base de pouzzolane. Comme pour les précédentes caractéristiques, la cure sous température de 80°C,

affaibli la microstructure et augmente la porosité de tous les BAP, ce qui traduit par l'élévation des sorptivités de tous les mélanges à cette température. Une augmentation de 17 ; 10 ; 38 et 52% entre l'absorption du BAPT ; BAPC ; BAPL et BAPP conservés à 80°C, respectivement, par rapport aux mêmes BAP conservés à 20°C. En effet, les plus grandes valeurs sont mesurées à cette température pour tous les mélanges.

L'effet du traitement thermique sur la distribution de la taille des pores et de la résistance à la compression des différents BAP, a fait l'objet de l'étude de Reinhardt et Stegmaier [249]. Ces auteurs ont montré à travers cette étude que l'augmentation de la température de cure, conduit à une modification dans la taille des pores à des pores plus grossiers sans augmenter le volume total des pores dans le béton.

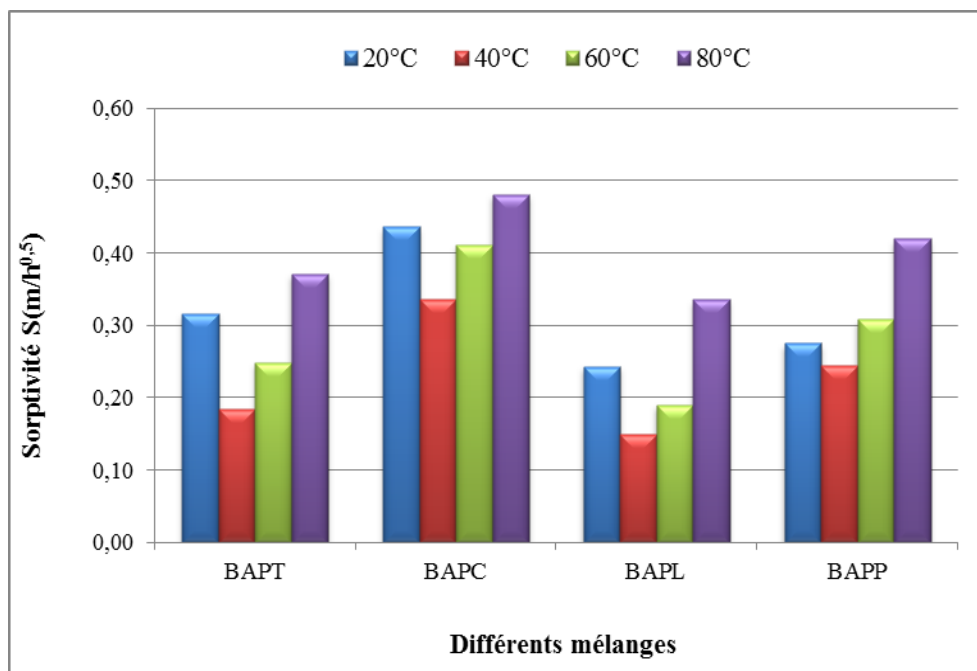


Figure 3.52 : Sorptivité à l'âge de 28 jours des différents BAP en fonction de la température de cure.

En outre, Ramezianpour et al. [234] ont trouvé que l'augmentation de la température de cure de 60°C à 70°C ne présente pas une amélioration dans la durabilité (l'imperméabilité) du BAP en termes d'absorption capillaire. Cela pourrait être dû à la formation rapide du gel de C-S-H et CH qui conduit à une structure hétérogène et des pores plus grossiers.

Du même, Ho et Cao [259] ont exploré l'effet du traitement thermique (55°C pendant 8h) sur la porosité des mélanges de béton incorporant diverses combinaisons de cendres volantes, laitier granulé et fumées de silice. Il a été constaté sur la base de leur sorptivité, que les bétons muris à une température élevée sont plus poreux en comparaison à un béton mûri dans les conditions normales pendant 2 à 3 jours.

### 3.6.3 Synthèse de résultats des propriétés de transfert

La pérennité d'un ouvrage en béton et sa durabilité dans le temps, dépend de plusieurs paramètres liés d'une part à l'environnement et d'autre part au matériau lui-même. Il est généralement admis qu'un béton durable est un béton résistant aux agressions. La pénétration de gaz et des différents fluides dans le béton s'effectue par l'intermédiaire du réseau poreux de la matrice cimentaire, qui représente une barrière ouverte au milieu extérieur, permettant ainsi le passage des différents agents agressifs. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs. La formulation particulière des BAP pourrait les entraîner à posséder une porosité et absorption d'eau inférieures à celles des bétons vibrés.

A partir de l'ensemble des résultats relatifs aux indicateurs de durabilité (porosité et absorption capillaire), il apparaît ce qui suit.

- En ce qui concerne l'effet des additions minérales, le réseau poreux du béton dépend de la nature et de l'intensité de leur effet physico-chimique, microstructural et éventuellement chimique, l'amélioration de la porosité du béton est d'autant plus importante que l'addition est réactive ;
- Dans les conditions normales (20°C), le laitier et la pouzzolane réduisent la porosité et l'absorption des BAP par une densification de la matrice cimentaire due à l'activité hydraulique ou pouzzolanique de ces deux additions. Ce qui permet la production d'une quantité supplémentaire de C-S-H qui segmente les pores capillaires en réduisant leurs dimensions. Contrairement à l'addition calcaire qui affecte négativement ces deux critères. En effet le BAPC présente une porosité et sorptivité relativement importantes par rapport à celles développées par les autres BAP ;



- Au-delà de 20°C, l'augmentation de la température, affecte négativement l'effet pouzzolanique de la pouzzolane naturelle. En effet, la porosité et l'absorption des BAPP sont relativement importantes par rapport à celles développées par le BAPT. Les fillers calcaires affectent négativement ces deux propriétés. Contrairement, le laitier granulé par son effet hydraulique latent, a prouvé une bonne efficacité sous des températures élevées. En effet les BAPL, sont les mélanges les moins poreux par rapport aux autres BAP, et ceci pour toutes les températures de cure ;
- La température de cure de 40°C, est jugée la plus adéquate en terme de porosité et absorption, contrairement à la cure à 80°C qui augmente d'une façon remarquable ces paramètres.

### 3.7. Conclusion

L'objectif de ce chapitre a été l'étude de l'effet des additions minérales et températures de cure sur les caractéristiques d'un béton autoplaçant. En premier lieu, on s'est intéressé à l'effet des additions minérales sur le comportement des différents BAP à l'état frais. En deuxième lieu, l'étude est menée sur l'effet de ces additions sur le dégagement de chaleur, ainsi les propriétés mécaniques et de transfert qui régissent la durabilité des différents BAP à l'état durci et muri sous températures élevées. À la lumière des résultats obtenus, les principales conclusions que nous pouvons tirer, sont les suivantes :

- Tous les mélanges ont vérifié les propriétés d'écoulement d'un béton autoplaçant. En effet, les trois principales caractéristiques normalisées : capacité au remplissage et au passage et la résistance à la ségrégation qui permettent de garantir la qualité autoplaçante d'un béton, sont pratiquement satisfaites par les trois additions utilisées ;
- Les mélanges autoplaçants avec des additions minérales présentent un comportement à l'état frais différent que celui du mélange sans addition. Cet effet est lié principalement à la forme et texture différentes des grains ; composition chimique et minéralogique différentes des additions minérales utilisées, ainsi à leur interaction avec le ciment et le superplastifiant ;

- Le calcaire et le laitier granulé agissent très efficacement, en améliorant tous les paramètres d'écoulement des BAP à l'état frais. Une augmentation de la fluidité, et diminution du seuil de cisaillement et viscosité plastique qui facilitent l'écoulement du béton. Avec un maintien d'ouvrabilité jusqu'à 90 min après malaxage, ce qui les rends très bénéfiques pour un bétonnage en climat chaud ;
- L'utilisation de la pouzzolane naturelle entraîne une diminution dans les propriétés d'écoulement du mélange. Cette addition possède une grande demande en eau, due à la structure poreuse de leurs grains, ainsi à la présence des aluminates et alcalis dans sa composition, ce qui entraîne une augmentation de la viscosité plastique du mélange et, par conséquent, sa stabilité sera améliorée. Cependant, une perte plus rapide de sa ouvrabilité (avant 1h après malaxage) est observée, ce qui la rend plus efficace pour un bétonnage en climat froid ;
- À l'échelle des bétons autoplaçants, l'élévation de la température de maturation ne modifie pas significativement le réseau poreux impliquant la faible variation des propriétés mécaniques et de transfert de ces derniers. Quel que 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) ;
- 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 ;
- 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, mais restent toujours acceptables.

**CONCLUSION GÉNÉRALE ET  
RECOMMANDATIONS**

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

### Conclusions Générales

Le béton autoplaçant constitue 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. La confection de ces bétons (BAP) nécessite un grand volume d'addition minérale de manière à augmenter le volume de pâte permettant ainsi d'atteindre la fluidité qui fait la spécificité liée à les exigences de mise en œuvre de cette nouvelle génération de bétons, ce qui pourrait modifier leur comportement mécanique à l'état durci, notamment sous des températures de cure élevées.

La présente recherche avait pour principal objectif d'apporter une contribution à l'étude de l'évolution des propriétés mécaniques (résistance à la compression et traction par flexion ; vitesse ultrasonique et module d'élasticité) et celles du transport (porosité ouverte et absorption capillaire) d'un béton autoplaçant mûri sous température de cure élevée. À cet objectif principal s'est ajoutée l'étude de l'effet de substitution de 15% du poids de ciment par l'un des trois additions minérales disponibles en Algérie, tel que le calcaire, le laitier granulé et la pouzzolane naturelle sur les performances d'un béton autoplaçant soumis à quatre températures de mûrissement humide (20, 40, 60 et 80°C) pendant sept jours, suivi par un mûrissement humide à 20°C jusqu'à l'échéance des essais.

Sur la base de cette étude expérimentale, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Il est possible d'avoir des propriétés d'écoulement d'un béton autoplaçant pour tous les BAP lorsque le ciment est substitué par 15% de l'un des additions minérales employées dans cette étude. En effet, les trois principales caractéristiques normalisées : capacité au remplissage et au passage, et la résistance à la ségrégation qui permettent de garantir la qualité autoplaçante d'un béton sont pratiquement satisfaites par les trois additions utilisées ;

- Les mélanges autoplaçants avec des additions minérales présentent un comportement à l'état frais différent que celui du mélange sans addition. Cet effet est lié principalement à la différence de texture des grains ; de composition chimique et minéralogique différentes des additions minérales utilisées, ainsi qu'à leur interaction avec le ciment et le superplastifiant ;
- Le calcaire et le laitier granulé agissent très efficacement, en améliorant tous les paramètres d'écoulement des BAP à l'état frais. Une augmentation de la fluidité, et diminution du seuil de cisaillement et viscosité plastique qui facilitent l'écoulement du béton, avec un maintien d'ouvrabilité jusqu'à 90 min après malaxage, ce qui les rends très bénéfiques pour un bétonnage en climat chaud ;
- L'utilisation de la pouzzolane naturelle entraîne une diminution dans les propriétés d'écoulement du mélange. Cette addition possède une grande demande en eau, due à la structure poreuse de ses grains, ainsi à la présence des aluminates et alcalis dans sa composition, ce qui entraîne une augmentation de la viscosité plastique du mélange et, par conséquent, sa stabilité sera améliorée. Mais avec une perte plus rapide de son ouvrabilité (avant 1h après malaxage), ce qui la rend plus efficace pour un bétonnage en climat froid ;
- La cinétique de durcissement est fortement influencée par la nature de l'addition. En effet, la pouzzolane naturelle par son activité pouzzolanique, est considérée la meilleure addition pour substituer le ciment à 20°C. En outre, le laitier avec son réactivité lente qui lui donne un effet d'un retardateur de prise, il n'est efficace qu'à long terme. Toutefois, l'utilisation de l'addition calcaire considérée comme inerte, ne peut être justifiée que par des considérations économiques et écologiques particulières ;
- À l'échelle d'un béton autoplaçant, l'élévation de la température de maturation ne modifie pas significativement le réseau poreux impliquant la faible variation des propriétés mécaniques et de transfert de ce dernier. En effet, quel que 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) ;

- 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 ;
- L'augmentation de la température de cure, engendre une augmentation considérable de la résistance à jeune âge pour tous les BAP. 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, elle 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, mais restent toujours acceptables ;
- Pour le cas des BAP subissant 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 ;
- Sur la base des résultats trouvés pour les résistances mécaniques, la déformation élastique et les propriétés de transport, tous les BAP sont considérés comme satisfaisants pour une application dans les éléments structuraux, et les effets d'une température de durcissement élevée ne sont pas assez préjudiciables aux propriétés du BAP que dans le cas du béton vibré.

### Recommandations

Dans le travail présenté dans cette thèse, on s'est intéressé à l'étude de l'effet de l'élévation de température de durcissement sur les propriétés mécaniques et de transfert d'un béton autoplaçant, à travers la valorisation des additions minérales les plus employées en Algérie, tel que les fillers calcaires, le laitier granulé et la pouzzolane naturelle. Les résultats trouvés ont permis d'apporter quelques éléments de réponses aux préoccupations posées au début de cette thèse, mais ils ont soulevé aussi quelques points intéressants à explorer à l'avenir. Pour cela on recommande d'approfondir notre recherche par les points suivants :

Afin de mieux comprendre l'effet de température élevée sur les caractéristiques des BAP, il serait intéressant d'étudier d'autres propriétés à l'état durci :

- D'autres propriétés de transport (perméabilité à l'oxygène et à l'eau, migration des ions chlorures, etc.) ;
- Etude détaillée à l'échelle de la microstructure des différents mélanges par microscopie électronique à balayage (MEB) et l'identification des phases cristallines par diffractométrie des rayons X (DRX) ;
- L'utilisation d'autres additions minérales et sous-produits industriels ;
- Autres comportements mécaniques tel que la résistance à la fatigue, le retrait et fluage, résistance au gel/dégel...etc. ;

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Sedran T., *Les bétons autonivelants - Synthèse bibliographique*, Bulletin liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, 1995, pp. 53-60.
- [2] Okamura H., Ouchi M., *Self-compacting concrete*, Journal of advanced Concrete Technology, 2003, Vol. 1, N°1, pp. 5-15.
- [3] Kaszynska M., Nowak A. S., *Effect of mixing tolerances on performance of self-consolidating concrete (SCC)*, Proceedings of third International Symposium on High Performance Concrete, Orlando, Florida, 19-22 October, 2003, 16 pp.
- [4] Khayat K. H., Assaad J., Daczko J., *Comparison of field-oriented test methods to assess dynamic stability of self-consolidated concrete*, ACI Materials Journal, 2004, Vol. 101, N° 2, pp. 168-176.
- [5] Boukendakdji O., *Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires*, Thèse de Doctorat, 2010, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 198 p.
- [6] El Barrak M., *Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais*, Thèse de Doctorat, 2005, Université Toulouse III – Paul Sabatier, France, 228 p.
- [7] AFGC, Association Française de Génie Civil, *Recommandations pour l'emploi des Bétons autoplaçant*, 2008.
- [8] Skarendhal A., Peterson O., *Self-compacting concrete : state of the art*, rapport de comité technique du RILEM, 174-SCC, RILEM publication, 2001, France.
- [9] Legrand C., *La structure des suspensions de ciment*, le béton hydraulique, 1982, Presse de l'ENPC.
- [10] Khayat K. H., *Workability testing and performance of self-compacting concrete*, ACI Materials Journal, 1999, Vol.96, N°3, pp. 346-352.
- [11] Khayat K. H., Tang T. S., *Fresh concrete properties*, State of the Art Report (23) of RILEM Technical Committee 174-SCC, Edited by Skarendahl A. et Petersson O., RILEM Publications S.A.R.L, Cachan Cedex, France, 2000, pp.17–22.

- [12] EFNARC, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, EFNARC, Norfolk, UK, February 2002, 32 p.
- [13] EFNARC, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*, 2005.
- [14] De Schutter G., *Guidelines for testing fresh self-compacting concrete*, 2005.
- [15] NF EN 206-9, *Béton, Partie 9 : Règles complémentaires pour le béton autoplaçant*, 2010. AFNOR.
- [16] Assié S., Escadeillas G., Marchese G., Waller V., *Durability properties of low-resistance self-compacting concrete*, Magazine of Concrete Research, 2006, Vol. 58, pp. 1-7.
- [17] Larrard F., Sedran T., Hu C., Sztikar J. C., Joly M., Derkx F., *Evolution of the workability of superplasticized concrete: assessment with BTRHEOM rheometer*, RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Concrete, 1996, RILEM proceedings 32, Glasgow, Scotland, pp. 377-388.
- [18] Nielsson I., Wallevik O. H., *Rheological evaluation of some empirical test methods, preliminary results*, Proceedings of the Third International Symposium of SCC, Reykjavik, Island, 17-20 August, 2000, pp. 59-68.
- [19] Wallevik, O. H., *Rheology - A scientific approach to develop self-compacting concrete*, Proceedings of the Third International Symposium of SCC, Reykjavik, Island, 17-20 August, 2003, pp. 23-34.
- [20] De-Larrard F., *Structures granulaires et formulations des bétons*, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Avril 2000, Paris, France.
- [21] Abib Z., *Formulations et caractérisation des bétons autoplaçants*, Mémoire de Magister, 2004, USTHB, Alger, Algérie.
- [22] Kennedy, C. T., *The Design of Concrete Mixes*, Proceedings of the American Concrete Institute, 1940, Vol.36, pp. 373-400.
- [23] Ouchi M., Edamatsu Y., *A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete*, In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.

- [24] Bethmont S., *Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP)*, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005, France.
- [25] Billberg P., *Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration*, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 23-25 Octobre 2001, Tokyo, Japon, pp. 285-294.
- [26] Assié S., *Durabilité des bétons autoplaçants*, Thèse de doctorat de l'Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2004, France.
- [27] Bury M. A., Christensen B. J., *The Role of Innovative Chemical Admixtures in Producing Self-Consolidating Concrete*, Proceedings of the 1st North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM, Chicago, Illinois, November 2002, pp. 137-141.
- [28] Aïtcin P. C., Jiang S., Kim B. G., Nkinamubanzi P. C., Petrov N., *L'interaction ciment-superplastifiant : Cas des polysulfonates*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées - 233, 2001, pp. 87-98.
- [29] Baron J., Ollivier J. P., *Les bétons, Bases et données pour leur formulation*, Publication ATHIL, 1996, Edition Eyrolles, 552 p.
- [30] El Hilali A., *Etude 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, 2009, France.
- [31] Sakata N., Yanai S., Yokozeki K., Maruyama K., *Study on new viscosity agent for combination use type of self-compacting concrete*, Journal of advanced concrete technology, 2003, Vol. 1, Issue 1, pp. 37-41.
- [32] Sedran T., De Larrard F., *Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model*, Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, 1999, Stockholm, Suède, pp. 321-332.
- [33] Klug Y., Holschemacher K., *Comparison of the hardened properties of Self-Compacting and Normal Vibrated Concrete*, 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, 2003, Iceland, pp. 596-605.
- [34] Domone P., *Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies*, Cement and Concrete Composites, 2006, Vol. 28, pp. 197-208.

- [35] Thomas M. D. A., Bamforth P. B., *Modelling chloride diffusion in concrete. Effect of fly ash and slag*, Cement and Concrete Research, 1999, Vol. 29, N° 4, pp. 487-495.
- [36] Shi C., Wu Y., Shao Y., Rieer M., *Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete*, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM Center, 2002, pp. 349-354.
- [37] Pineaud A., *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, 2007, France, 271 p.
- [38] Turcry P., Roziere E., Loukili A., *Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait des bretons autoplaçants*. XXIIIème Rencontres Universitaires de Génie-Civil, 2005, Grenoble.
- [39] Sonebi M., Bartos P. J. M., *Hardened SCC and its bond with reinforcement*, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), 13-15 September, 1999, Stockholm, Sweden, pp. 275-289.
- [40] Felekoglu B., Turkel S., Baradan B., *Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete*, Building and Environment J., 2007, Vol. 42, pp. 1795–1802.
- [41] Felekoglu B., *Utilization of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case)*, Resources, Conservation and Recycling, 2007, Vol. 51, Issue 4, pp. 770-791.
- [42] Parra C., Valcuende M., Gómez F., *Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, 2011, Vol. 25, N° 1, pp. 201-207.
- [43] Choi Y. W., Kim Y. J., Shin H. C., Moon H. Y., *An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research, 2006, Vol. 36, pp. 1595–1602.
- [44] Uysal M., Yilmaz K., *Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete*, Cement and Concrete Composites, 2011, Vol. 33, pp.771-776.
- [45] Nassif H. H., Najm H., Suksawang N., *Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC*, Cement and Concrete Composites, 2005, Vol. 27, pp. 661–670.

- [46] Roziere E., Granger S., Turcry P., Loukili A., *Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete*, Cement and Concrete Composites, 2007, Vol. 29, pp. 626–636.
- [47] Persson B., *A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete*, Cement and Concrete Research, 2001, Vol. 31, pp. 193-198.
- [48] Benkechkach G., *Etude du comportement différé des bétons autoplaçants : Influence des paramètres de composition et de chargement*, Thèse de Magister de l'Université de Montouri de Constantine, 2007, Algérie.
- [49] Sedran T., *Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999, France.
- [50] Domone P. L., *A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete*, Cement & Concrete Composites, 2007, Vol. 29, pp. 1–12.
- [51] Craeye B., Van I. P., Desnerck P., Boel V., De Schutter G., *Modulus of elasticity and tensile strength of self-compacting concrete: Survey of experimental data and structural design codes*, Cement & Concrete Composites, 2014, Vol. 54, pp. 53–61.
- [52] Pons G., Proust E., Assié S., *Creep and Shrinkage of Self-Compacting Concrete : A different behavior compared with vibrated concrete*, 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003, Reykjavik, Iceland, pp. 645-654.
- [53] Guneyisi E., Gesoglu M., *A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag*, Materials and Structures, 2008, Vol. 41, pp. 479–493.
- [54] Gesoglu M., Guneyisi E., Ozbay E., *Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume*, Construction and Building Materials, 2009, Vol. 23, pp.1847–1854.
- [55] Vitek J. L., *Long-Term Deformations of Self-Compacting Concrete*, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003, Reykjavik, Iceland, pp. 663-671.
- [56] Vieira M., Bettencourt A., *Deformability of hardened SCC*, 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003, Reykjavik, Iceland, pp. 637-644.

- [57] Hu C., Barbieri B., *Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel*, Science des matériaux et propriétés des bétons, 1ère Rencontre Internationale, 1998, Toulouse, pp. 265-272.
- [58] Lee K. M., Lee H. K., Lee S. H., Kim G. Y., *Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag*, Cement and Concrete Research, 2006, Vol. 36, pp. 1279–1285.
- [59] Ambrosia D. M., Lange A. D., Brinks J. A., *Restrained shrinkage and creep of Self-Consolidating Concrete SCC*, 30 October – 2 November 2005, Chicago, USA.
- [60] Benkechkache R., Houari H., Boukni B., *Investigation expérimentale des bétons spéciaux : influence des paramètres de composition et d'environnement sur les propriétés des bétons autoplaçants*, Séminaire international, Innovation et Valorisation en Genie Civil et Matériaux de Construction, 23-25 novembre 2011, Rabat, Maroc.
- [61] Persson B., Terrasi G. P., *High performance self-compacting concrete, HPSCC*, In: the sixth International Symposium on High Strength / High Performance Concrete, June 2002, Leipzig, pp. 1273-1290.
- [62] Kapoor Y., Munn C., Charif K., *Self-Compacting concrete – an economic approach*, Proceedings of Seventh International Conference on Concrete in Hot and Aggressive Environments, October 13–15, 2003, Manama, Kingdom of Bahrain, pp. 509–519.
- [63] Neville A., *Propriétés des Bétons*, Traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.
- [64] Persson B., *Creep, Shrinkage and Elastic Modulus of Self-Compacting Concrete*, Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete 1999 in Sweden, pp. 239-250.
- [65] Assie S., Escadeillas G., Waller V., *Self-Compacting and vibrated concrete compared by their physic-chemical durability properties*, SCC Symposium, 30 Octobre - 2 Novembre 2005, Chicago, USA.
- [66] Hanzic L., Ilic R., *Relationship liquid sorptivity and capillarity in concrete*, Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, N° 9, pp. 1385–1388.
- [67] Topcu I. B., Bilir T., Uygunoglu T., *Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete*, Construction Building Materials, 2009, Vol. 23, N° 5, pp. 1947–1953.

- [68] Turkmen I., Kantarci A., *Effect of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete*, Building and Environment, 2007, Vol. 42, N° 6, pp. 2378–2383.
- [69] Bessa B. A., *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, 2004, France.
- [70] De Schutter G., Audenaert K., Boel V., Vandewalle L., Dupont D., Heirman G., Vantomme J., Dhemricourt J., *Transport properties in self-compacting concrete and relation with durability: Overview of a Belgian research project*, Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), August 17-20, 2003, Reykjavik, Iceland, pp. 799-807.
- [71] Zhu W., Bartos P. J. M., *Permeation properties of self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, pp. 921-926.
- [72] Boel V., Audenaert K., De Schutter G., *Pore structure of self-compacting concrete*, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 2002, ACBM center, pp. 837-843.
- [73] Oliveira L. A. P., Jalali S., Fernandes J. M., Torres E., *L'emploi de Metakaolin dans la production de béton écologiquement efficace*, Materials and Structures, 2005, Vol. 38, pp. 403-410.
- [74] Zhu W., Quinn J., Bartos P. J. M., *Transport properties and durability of self-compacting concrete*, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 2001, Tokyo, Japon, pp. 451-458.
- [75] De Schutter G., Audenaert K., *Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration*, Materials and Structures, Vol. 37, 2004, pp. 591-596.
- [76] Hou W. M., Chang P. K., Hwang C. L., *A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag*, Cement and Concrete Research, 2004, Vol. 34, pp. 615–622.
- [77] Tang L., Andalen A., Johansson J. O., Hjelm S., *Chloride diffusivity of self-compacting concrete*, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 1999, Stockholm, Suède, pp.187-198.

- [78] Rougeau P. , Maillard J. L., Mary-Dippe C., *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, 1999, Stockholm, Suède, pp. 251-261.
- [79] Mortsell E., Rodum E., *Mechanical and durability aspects of SCC for road structures*, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 2001, Tokyo, Japon, pp. 459-468.
- [80] Attiogbe E. K., See H. T., Daczko J. A., *Engineering properties of self-consolidating concrete*, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Novembre 2002, ACBM center, pp. 371-376.
- [81] Audenaert K., De Schutter G., *Chloride penetration in self-compacting concrete*, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on self-compacting Concrete, 2003, Reykjavik, Iceland, pp. 818-825.
- [82] Trägårdh J., Skoglund P., Westerholm M., *Frost resistance, chloride transport and related microstructure of field self-compacting concrete*, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003, Reykjavik, Iceland, pp. 881-891.
- [83] Sakata K., *Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete*, CONSEC 98, International Conference 2, 1998, Tronso GB, pp.2057-2064,
- [84] Audenaert K., De Schutter G., *Influence of moisture on the carbonation of self-compacting concrete*, Proceedings (SP 212) of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Juin 2003, Greece, pp.451-465.
- [85] Safiuddin M., West J. S., Soudki K .A., *Durability performance of self-compacting concrete*, Journal of Applied Sciences Research, 2008, Vol. 4, N° 12, pp. 1834–1840.
- [86] Nagai T., Kojima T., Miura T, *Application of high-strength / super-workable concrete to thinwall prestressed concrete products*, Magazine of Concrete Research, 1999, Vol. 51, N° 3, pp. 153-62.
- [87] Uysal M., Sumer M., *Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures*, Construction and Building Materials, 2011, Vol. 25, 4112-4120.
- [88] RILEM Technical Committee, *Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of self-compacting concrete*, Materials and Structures, 2008, Vol. 41, pp. 225–233.



- [89] Persson B., *Fire resistance of self-compacting concrete, SCC*, Materials and Structures, 2004, Vol. 37, pp. 575-584.
- [90] De Larrard, F., *Construire en béton. l'essentiel sur les matériaux*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2002, France.
- [91] Boukhelkhal A., *Rhéologie, caractérisation physico-mécaniques et durabilité des bétons autoplaçants à base de la poudre de marbre*, Mémoire de Magister, 2012, Université Ammar Telidji de Laghouat, Algérie.
- [92] Hans-Erik G., Pentti P., *Properties of SCC- especially early age and long term shrinkage and salt frost*, Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 1999, Sweden, pp. 211-225.
- [93] Persson B., *Internal frost resistance and salt frost scaling of Self-Compacting Concrete*, Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, pp. 373-379.
- [94] Khayat K. H., Assaad J., *Air-void stability in Self-Consolidating Concrete*, ACI Materials Journal, 2002, Vol. 99, N°4, pp. 408-416.
- [95] Bassuoni M. T., Nehdi M. L., *Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading*, Cement and Concrete Research, 2009, Vol. 39, pp. 206–226.
- [96] Zhang X., Han J., *The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste*, Cement and Concrete Research, 2000, Vol.30, N°5, pp. 827-830.
- [97] Nehdi M., Mindess S., Aïtcin P. C., *Rheology of high-performance concrete: Effect of ultrafine particles*, Cement and Concrete Research, 1998, Vol. 28, N°5, pp. 688-697.
- [98] Cyr M., *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, 1999, INSA de Toulouse et Université de Sherbrooke.
- [99] Cyr M., Mouret M., *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, 2003, Berlin, Allemagne, pp. 241-255.

- [100] Lange F., Mörte H., Rudert V., *Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties*, Cement and Concrete Research, 1997, Vol. 27, N°10, pp. 1481-1488.
- [101] Mehta P. K., *Pozzolanic and cementitious by-products in concrete : Another look*, Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 1989, Trondheim, Norway, pp. 1-43.
- [102] Ezziane K., *Etude des modifications physico-mécaniques apportées par les ajouts minéraux aux bétons*. Thèse de Doctorat, 2007, Université de Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie.
- [103] Felekoglu B., Tosun K., Baradan B., Altun A., Uyulgan B., *The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars*, Cement and concrete research, 2006, Vol. 36, pp. 1719-1726.
- [104] Lawrence P., *L'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires*, Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, 2000, Toulouse III, France.
- [105] Lawrence P., Cyr M., Ringot E., *Mineral admixtures in mortars, Effect of inert materials on short-term hydration*, Cement and concrete research, 2003, Vol. 33, pp. 1939-1947.
- [106] Cyr M., Lawrence P., Ringot E., *Efficiency of mineral admixtures in mortars, Quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength*, Cement and concrete research, 2006, Vol. 36, pp. 264-277.
- [107] Kara A. R., *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, 2002, France.
- [108] Lawrence P., Cyr M., Ringot E., *Mineral admixtures in mortars, Effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength*, Cement and concrete research, 2005, Vol. 35, pp. 1092-1105.
- [109] Cyr M., Lawrence P., Ringot E., Gibergues C., *Variation des facteurs d'efficacité caractérisant les additions minérales*, Materials and Structures, 2000, Vol. 33, pp. 466-472.

- [110] Grzeszczyk S., Lipowski G., *Effect of content and particle size distribution of high calcium fly ash on the rheological properties of cement pastes*, Cement and concrete research, 1997, Vol. 27, pp. 907-916.
- [111] Collins F., Sanjayan J. G., *Effect of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder*, Cement and concrete research, 1999, Vol. 29, pp. 459-462.
- [112] Cyr M., Lawrence P., Ringot E., *Mineral admixtures in mortars, Quantification of the physical effects of inert materials in relation on short term hydration*, Cement and concrete research, 2005, Vol. 35, pp. 719-730.
- [113] Ramlchan T., Thomas M. D. A., Hooton R. D., *The effect of Pozzolana and Slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature, Part II: Micro-structural and microchemical investigations*, Cement and Concrete Research, 2004, Vol. 34, pp. 1341-1356.
- [114] Memon A. H., Radin S. S., Zain M. F. M., Trottier J. F., *Effect of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater*, Cement and Concrete Research, 2002, Vol. 32, pp. 373-377.
- [115] Gutteridge W. A., Dalziel J. A. *Filler cement: the effect of the secondary component on the hydration of Portland cement*, Cement and Concrete Research, 1990, Vol. 20, pp.778 – 782.
- [116] Caré S., Linder R., Baroghel B. V., De Larrard F., Charonnat Y., *Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage du béton - Plan d'expérience et analyse statique*, LCPC, Ouvrages d'art OA 33, février 2002.
- [117] Benzet J. C., Benhassine A., *The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder*, Powder Technology, 1999, Vol. 103, pp. 26-29.
- [118] Husson S., *Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment - fillers: application aux mortiers*, Thèse de l'école normale supérieure des mines de Saint-Étienne, 1991.
- [119] NF EN 206/CN, *Béton : spécification, performance, production et conformité*, Complément national à la norme NF EN 206, AFNOR, 2014, France.

- [120] Diederichi P., *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, 2010, France.
- [121] NF P18-508, *Additions pour béton hydraulique – Additions calcaires – Spécifications et critère de conformité*, 2012, AFNOR.
- [122] Jones M. R., Zheng L., Newlands M. D., *Estimation of the filler content required to minimize voids ratio in concrete*, Magazine of Concrete Research, 2003, Vol. 55, N° 2, pp.193- 202.
- [123] Schmidt M., *Cement with interground additives capabilities and environmental relief, Part 1*, Zement-Kalk-Gips, 1992, Vol. 45, N° 2, pp. 64-69.
- [124] Habbouche A., *Propriété mécaniques et durabilité du béton à base de sable de concassage*, Mémoire de Magistère, Département de Génie Civil, 2002, Université de SAAD DAHLEB Blida, Algérie.
- [125] Yahia A., Tanimura M., Shimoyama, Y., *Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio*, Cement and Concrete Research, 2005, Vol. 35, N° 3, pp.532-539.
- [126] Zhu W., Gibbs J. C., *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete*, Cement and Concrete research, 2005, Vol. 35, N° 8, pp. 1457-1462.
- [127] Derabla R., Larbi B. M., *Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term*, Construction and Building Materials, 2014, Vol. 66, pp. 787–794.
- [128] Bellifa S., Ghomari F., Boukli Hacene M. A., Taleb O., *Influence des fillers calcaires sur la porosité et la distribution porale des pates autoplaçantes*, Janvier 2015, Revue « nature & technologie ». A- sciences fondamentales et engineering, N° 12, pp. 60-66.
- [129] Ye G., Liu X., De Schutter G., Poppe A. M., Taerwe L., *Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes*, Cement & Concrete Composites, 2007, Vol. 29, pp. 94-102.
- [130] Gibbs J. C., Zhu W., *Strength of hardened self-compacting concrete*, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), 13-15 septembre 1999, Stockholm, Suède, pp. 199-209.

- [131] Michel F., Pierard J., Courard L., Pollet V., *Influence of physic-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances*, Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC, 2007, Ghent, Belgium, pp. 205-210.
- [132] Saadi S., *Effet de l'Environnement de Cure sur les Propriétés des Ciments Ternaires (CPA-PN-FC)*, Thèse de Magister, 2007, Université de Blida, Algérie.
- [133] Amouri C., *Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performance, durabilité)*, Thèse de Doctorat, 2009, Université de Constantine, Algérie.
- [134] Bouali R., *Contribution à l'étude d'un ciment Portland artificiel et d'un béton avec ajout calcaire*, Mémoire de fin d'étude, 1993, INFSA, Alger, 81 p.
- [135] Bosiljkov V. B., *SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler*, Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, pp. 1279-1286.
- [136] Xiong X., Van B. K., *Hydration processes of cements blended with limestone powder - Experimental study and numerical simulation*, Proceedings of the 11th ICCR, 2003, Durban.
- [137] Kakali G., *Hydration products of C<sub>3</sub>A, C<sub>3</sub>S and Portland cement in the presence of CaCO<sub>3</sub>*, Cement and Concrete Research, 2000, Vol. 30, pp. 1073-1077.
- [138] Petersson Ö., *Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength*, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 2001, Tokyo, Japan, pp.277-284.
- [139] Nonat A., *Interaction between chemical evolution and physical evolution, in the case of tricalcium silicate*. Materials and Structures, 1994, pp. 187-195.
- [140] Boukni B., Bensebti S., Chabane A., Houari H., *Comportement des bétons autoplaçants à haute température» Journée d'études sur les bétons hydrauliques et hydrocarbonés*, Université du 20 Août 1955, 2007, Skikda, Algérie.
- [141] Van B. K., Montgomery D., *Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone*, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 1999, Stockholm, Sweden, pp. 227-238.

- [142] Arroudj K., Oudjit M. N., *Influence de sable de dune finement broyé sur les propriétés des bétons*, Séminaire National de Génie Civil, 28-29 jan 2003, ENSET Oran, 9p.
- [143] Chaid R., Jaubertthieet R., Boukhaled A., *Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons*, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, 2010, INSA - Rennes, France, pp. 91-103.
- [144] Buil, M., Ollivier J. P., *Conception des bétons : la structure poreuse. Durabilité des bétons*, sous la direction de Baron J. et Ollivier J. P., Presse de l'ENPC, 1992, pp. 57-99.
- [145] Tsivilis S., Batis G., Chaniotakis E., Grigoriadis G., Theodossis D., *Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar*, Cement and concrete research, 2000, Vol.30, pp. 1679-1683.
- [146] Tsivilis S., Tsantilas J., Kakali G., Chaniotakis E., Sakellariou A., *The permeability of Portland limestone cement concrete*, Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, pp. 1465–1471.
- [147] Boel V., Audenert K., Schutter G.D., Experimental durability evaluation of SCC concrete with limestone filler, 30 octobre – 2 novembre 2005, Chicago, USA.
- [148] Siad H., Kamali S., Bernard M., Escadeillas G., Mouli M., Khelafi C. H., *Characterization of the degradation of self-Compacting concretes in sodium sulfate Environment : Influence of different mineral admixtures*, Construction and Building Materials, 2013, Vol. 47, pp. 1189-1200.
- [149] Assie S., Escadeillas G., Waller V., *Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability*, Construction and Building Materials, 2007, Vol. 21, Issue 10, pp.1909-1917.
- [150] Siad H., Kamali-Bernard S., Mesbah H. A., Khelafi H., Escadeillas G., *Influence du type d'addition minérale sur les propriétés de transfert des Bétons Autoplaçants*, Séminaire International, INVACO II, 2011, Rabat, Maroc.
- [151] NF EN 15167-1, *Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis – Partie 1 : définition, exigences et critères de conformité*, 2006, AFNOR.

- [152] Wainwright P. J., *Properties of fresh and hardened concrete incorporating slag cement*, Concrete Technology and Design, Cement Replacement materials, 1986, Vol. 3, pp. 100-128.
- [153] Fulton F. S., *The properties of Portland cements containing milled granulated blast furnace slag*, South Africa Portland cement institute Monograph, 1974, Johannesburg.
- [154] Kateb M. L., *Formulations des Bétons Autoplaçants à base de Laitier*, Mémoire de Magister, Juillet 2006, USTHB, 139 p.
- [155] Kadri E.H., Duval R. *Effect of silica fume on the heat of hydration of high-performance concrete*, The Seventh CANMET/ACI International conference on Fly Ash, Selica Fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete, 2001, Madras, India, pp. 22-27.
- [156] Gesoglu M., Guneyisi E., Swara F. M., Hatice O. O., Mermerdas K., Recycling ground granulated blast furnace slag as cold bonded artificial aggregate partially used in self-compacting concrete, *Journal of Hazardous Materials*, 2012, pp. 352–358.
- [157] Uysal M., Yilmaz K., Ipek M., *The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete*, *Construction and Building Materials*, 2012, Vol. 27, pp. 263–270.
- [158] Sheen Y. N., Le D. H., Sun T. H., Greener self-compacting concrete using stainless steel reducing slag, *Construction and Building Materials*, 2015, Vol. 82, pp. 341–350.
- [159] Toutou Z., *Rhéologie et formulation des géo-suspensions concentrées : évaluation des conditions d'extrudabilité*, Thèse de doctorat, 2002, INSA de Rennes, France.
- [160] Ferraris C. F., *Measurement of the rheological properties of high performance concrete : state of the art report*, Research of the National Institute of Standards and Technology, 1999, Vol. 104, N° 5, pp. 461-478.
- [161] Vejmelkova E., Keppert M., Grzeszczyk S., Skalinski B., Cerny R., *Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag*, *Construction and Building Materials*, 2011, Vol. 25, pp. 1325–1331.
- [162] Necira B., Guettala A., Chabi S., *Formulation des bétons autoplaçants: Effet des ajouts minéraux et des adjuvants*, Sciences Technologies et Développement – ANDRU, 2007, N° 2, pp. 66-79.

- [163] European Union Growth Contract No. G6RD-CT-2001-00580, *Measurement of properties of fresh self-compacting concrete*, Final Report – Project coordinator: ACM Centre, 2005, University of Paisley, UK.
- [164] Baron J., Santerey R., *Béton hydraulique connaissance et pratique*, Presse de l'école des ponts et chaussées, 1982, Edition Eyrolles, France.
- [165] Brooks J. J., Johari M.A. M., Mazloom M., *Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete*, *Cement & Concrete Composites*, 2000, Vol. 22, pp. 293-301.
- [166] Paine K. A., Dhir Obe R. K., Zheng L., *Predicting early-age temperatures of blended-cement concrete*, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Construction Materials*, 2006, Vol. 159, Issue CM4, 2006, pp. 163–170.
- [167] Boucetta T. A., *Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances*, Thèse de Doctorat, 2014, Université d'Annaba, Algérie.
- [168] Bougara A., Lynsdale C., Ezziane K., *Activation of Algerian slag in mortars*, *Construction and Building Materials*, 2009, Vol. 23, N° 1, pp. 542–547.
- [169] Anastasiou E. K., Papayianni I., Papachristoforou M., *Behavior of self-compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement*, *Materials and Design*, 2014, Vol. 59, pp. 454–460.
- [170] Zivica V., *Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures*, *Construction and Building Materials*, 2007, Vol. 21, pp.1463-1469.
- [171] Guettache M. N., *Contribution à la valorisation des laitiers de haut-fourneau d'El-Hadjar dans le domaine de la construction: caractérisation des matériaux élaborés*, Thèse de Doctorat d'Etat, 2002, Université de Constantine, 210 p.
- [172] Behim M., Habitat M. F., Clastres P., *Influence de la teneur en laitier granulé et de sa finesse de mouture sur les propriétés mécaniques des ciments à sa base*, Colloque Maghrebin de Génie Civil, 30 Nov-1 Déc, 1999, Anaba, pp. 3-7.
- [173] Borsoi A., Collepari M., Collepari S., Troli R., Zanardi L., *Low-heat high-strength durable self-consolidating concretes*, 9th CANMET/ACI International Conference on recent Advances in Concrete Technology, 2007, Warsaw, Poland, pp. 399-409.



- [174] Kriker A., *Durabilité du béton à base de laitier*, Thèse de Master, July 1992, ENP Alger, 127 p.
- [175] Chloup-Bondant M., *Etude des mécanismes réactionnels dans l'hydratation des silicates et aluminates tricalciques en présence d'un filler calcaire*, Thèse de Doctorat, 1996, Université de Henri Poincaré, Nancy I, 156 p.
- [176] Amrane A., Kenai S., *Propriétés mécaniques et durabilité du béton au laitier en climat chaud*, Proceedings du séminaire international sur la qualité du béton en climat chaud, 1994, Ghardaia, pp. 106-122.
- [177] Wang H. Y., Lin C. C., *A study of fresh and engineering properties of self-compacting high slag concrete (SCHSC)*, Construction and Building Materials, 2013, Vol. 42, pp. 132–136.
- [178] Behim M., Clastres P., Habita M. F., Carles-Gibergues A., *Etude d'un nouveau ciment à base de Laitier granulé d'El-Hadjar (Algérie)*, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, Avril 2004, pp. 21-29.
- [179] Rouis F., *Formulation et Propriétés Mécaniques des Bétons Autoplaçants à Base de Laitier de Haut Fourneau*, Mémoire de Magister, 2007, Université Yahia Farès de Médéa, Algérie.
- [180] Hammat S., *Influence du laitier et de la pouzzolane sur le retrait des mortiers autoplaçants*, Mémoire de Magister, 2012, Université Saad Dahleb de Blida, Algérie.
- [181] Banforth P. B., *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, 1980, vol. 69 Sept., pp. 777-800.
- [182] Stutterheim N., *Properties and uses of high-magnesia Portland slag cement concrete*, A.C.I. Journal, 1960, Vol.56, pp. 1025-1045.
- [183] Tattersall G. H., Banfill P. F. G., *The Rheology of Fresh concrete*, 1983. Pitman, London.
- [184] Wainwright P. J., Tolloczko J. J. A., *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, vol.2, April, 1986, Madrid, Ottawa, pp. 1293-1321.

- [185] Guneyisi E., Gesoglu M., Ozbay E., *Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures*, Construction and Building Materials, 2010, Vol. 24, pp. 1878–1887.
- [186] Gane R. R., *Cours de durabilité et réparation du béton (GCI-714), Chapitre 2 : la durabilité du béton*, 2002, Université de Sherbrooke, Canada, pp.32.
- [187] Nehdi M., Pardhan M., Koshowski S., *Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements*, Cement and Concrete Research, 2004, Vol. 34, pp. 2103–2112.
- [188] Feldman F., *Significance of porosity measurements on blended cement performance*, 1st. intern, conf. on the use of fly ash, silica fume, slag and other mineral byproducts in concrete, Montebello, ACI, 1983, SP-79, pp. 415-433.
- [189] Al-Otaibi S., *Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass*, Construction and Building Materials, 2008, Vol. 22, pp. 2059–2067.
- [190] Mawmohan D., Mehta P. K., *Influence of pozzolanic slag and chemical admixture on pore size*, Admixture and Permeability of Hardened Cement Paste, A.S.T.M. No.1, 1981, pp. 63-67.
- [191] Nakamura N., Sakai M., Swamy R. N., *Effect of slag fineness on the engineering properties of high strength concrete blended cement in construction*, Elsevier applied science publishers , 1991, London , pp. 302-336.
- [192] Mansoor M. H. *The pore size distribution of cement paste containing varying proportions of fly ash and blast furnace slag*, PhD Thesis, 1978, London.
- [193] Shi H. S., Xu B. W., Zhou X. C., *Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete*, Construction and Building Materials, 2009, Vol. 23, N° 5, pp. 1980-1985.
- [194] Kouider Djelloul O., Menadi B., Wardeh G., Kenai S., *Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag*, Advances in Concrete Construction, 2018, Vol. 6, N° 2, pp. 103-121.
- [195] Sisomphon K., Franke L., *Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials*, Cement and Concrete Research, 2007, Vol. 37, N° 12, pp. 1647-1653.

- [196] Bouikni A., Swamy R. N., Bali A., *Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag*, Construction and Building Materials, 2009, Vol. 23, N° 8, pp. 2836-2845.
- [197] Stiti S., *Le pari des ciments Algérien*, Habitat et Construction, 1999, N°05, Alger, pp. 32-39.
- [198] Aichoube A., Ghrici M., Benaïssa A., *Effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire*, Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, 2005, Oran, Algérie, pp. 6-7.
- [199] Boudchicha A., *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, 2007, Université Mentouri Constantine, Algérie.
- [200] Colak A., *Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pouzzolana*, Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, pp. 585-593.
- [201] Mouli M., Khelafi H., *Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan*, Building and Environment, 2008, Vol. 43, pp. 31-36.
- [202] Allali M. A., *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, 2012, Algérie.
- [203] Diamantonis N., Marinos I., Katsiotis M. S., Sakellariou A., Papathanasiou A., Kaloidas V., Katsioti M., *Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, 2010, Vol. 24, N° 8, pp. 1518-1522.
- [204] Turanlı L., Uzal B., Bektas F., *Effect of large amounts of natural pozzolana addition on properties of blended cements*, Cement and Concrete Research, 2005, Vol. 35, N°6, pp. 1106-1111.
- [205] Kenai S., Debbih A., Menadi B., Kadri E. H., *Effect of coarse and fine recycled aggregates and natural pozzolana on fresh properties of self-compacting concrete*, The 2014 World Congress on Advances in Civil, Environmental and Materials Research (ICEM14), 24-28 Aout, Busan, Korea.

- [206] Mebrouki A., Belaribi N. B., Bouhamou N., Cyr M., *Contribution à l'étude de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers*, CITDUB 1, 24-26 mai 2004, Bab Ezzouar, Alger, Algérie, 9p.
- [207] Belas Belaribi N., Semcha M., Laoufi L., *Influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons*, Canadian journal of civil engineering, 2003, Vol 30, pp. 580-584.
- [208] Ezziane K., Bougara A., Kassoul A., Djezzar M., *Activation de la pouzzolane de Béni-Saf sous différentes température de cure*, Séminaire national de génie civil, 16-17 Avril, 2003, Sidi Belabas, 7p.
- [209] Benkaddour M., Kazi Aoual F., Semcha A., *Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle*, Revue Nature et Technologie, 2009, pp. 63-73.
- [210] Krachai R. M, Bouabdallah M. A., Abdelhadi H., Hamou K., *Influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les performances mécaniques des bétons autoplaçants*, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, 12- 14 Octobre, 2009, ENSET Oran, Oran, Algérie.
- [211] Adekunle S., Ahmad S., Maslehuddin M., Al-Gahtani H. J., *Properties of SCC prepared using natural pozzolana and industrial wastes as mineral fillers*, Cement & Concrete Composites, 2015, Vol. 62, pp. 125–133.
- [212] Celik K., Meral C., Mancio M., Mehta K., Monteiro P. J. M., *A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash*, Construction and Building Materials, 2014, Vol. 67, pp. 14–19.
- [213] Khelafi H., Kerdal D., *Etude expérimentale sur le comportement mécanique des mortiers contenant des fillers pouzzolaniques*, Proceedings du Séminaire International sur la qualité du béton en climat chaud, 22-24 Mars 1994, Ghardaia, pp.313-321.
- [214] Belhachemi B., *Influence de la surface spécifique de blaine sur les résistances d'un ciment pouzzolanique*, Colloque CMEDIMAT 2005, 6-7 Décembre 2005, 8p.
- [215] 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 p.

- [216] Boualla N., Kerrouzi I., Soufari A., *Influence de l'ajout pouzzolanique sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments au jeune âge*, Science Lib Editions Mersenne, 2012, Vol 4, N ° 121003ISSN, pp. 2111-4706.
- [217] Targan S., Olgun A., Erdogan Y., Sevinc V., *Influence on natural pouzzolan, colmatite ore waste, bottom ash, and fly ash on the properties of Portland cement*, Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, pp.1175-1182.
- [218] Ghrici M., Kenai S., Mezziane E., *Mechanical and durability properties of cement mortars with Algerian Pozzolana*, Journal of Material Science, Vol. 41, 2006, pp. 6572-6952.
- [219] Kaid N., Khelafi H., Cyr M., Zinai S. S., Ayed K., *Etude de l'influence de l'utilisation d'un ajout pouzzolanique local sur les caractéristiques d'un mortier par analyse micro structurelle*, Colloque CMEDIMAT 2005, 6-7 Décembre 2005, 8p.
- [220] Guenanou F., Khelafi H., *Retrait des mortiers contenant la pouzzolane naturelle et la perlite*,
- [221] Hadj Sadok A., Kenai S., Menadi B., *Résistances aux sulfates des mortiers à base de ciment au laitier*, Colloque International - Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures, 2008, Université M. Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.
- [222] Wojcik G. S., *The influence of the atmosphere on curing concrete temperature and maturity*, Advances in Cement and Concrete, Proceedings of the Engineering Conferences International, August 10-14, 2003, Copper Mountain, pp. 491-500.
- [223] Escalante-Garcia J. I., Sharp J. H., *The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures*, Cement Concrete Research, Vol. 31, N°5, 2001, pp. 695-702.
- [224] Lothenbach B., Winnefeld F., Alder C., Wieland E., Lunk P., *Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes*, Cement Concrete Res., 2007, Vol. 37, pp. 483-491.
- [225] Kim J. K., Moon Y. H., Eo. S. H., *Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature*, Cement Concrete Res., 2000, Vol. 28, pp. 1761-1773.

- [226] Kanstad T., Hammer T. A., Bjontegaard O., Sellevold E. J., *Mechanical properties of young concrete: Part I: Experimental results related to test methods and temperature effects*, Materials and Structures, 2003, Vol. 36, N° 4, pp. 218-225.
- [227] Erdogdu S., Kurbetci S., *Influence of cement composition on the early age flexural strength of heat-treated mortar prisms*, Cement and Concrete Composites, 2005, Vol. 27, N° 7-8, pp. 818–822.
- [228] Ramlochan T., Zacarias P., Thomas M. D. A., Hooton R. D., *The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature Part I: Expansive behaviour*, Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, N°6, pp. 807-814.
- [229] Vinh-An Le, *Comportement des bétons autoplaçant par temps chaud*, Thèse de Doctorat, 2014, Université de Toulouse, France, 190 p.
- [230] Bingol A. F., Tohumcu I., *Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self-compacting concrete incorporating fly ash and silica fume*, Materials and Design, 2013, Vol. 5, pp.12–18.
- [231] Zhao H., Sun W., Wu X., Gao B., *Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concrete*, Materials and design, 2012, Vol. 35, pp. 194-200.
- [232] Kellouche Y., Bougara A., *Effet de la température de cure sur la réactivité d'un ciment au laitier*, 1st International Conference on Pozzolanic Construction Materials, ICPCM, 2014, Oran, Algérie.
- [233] Ramezani pour A. M., Esmaili K., Ghahari S. A., Ramezani pour A. A., *Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, 2014, Vol. 73, pp.187–194.
- [234] Ramezani pour A. A., Khazali M. H., Vosoughi P., *Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete*, Construction and Building Materials, 2013, Vol. 49, pp. 807–813.
- [235] Charbel A., *effet couplé de la formulation et du murissement sur les caractéristiques du béton autoplaçant à haute performance dans les conditions estivales*, Mémoire de Maitrise en Sciences Appliquées, 2008, Université de Sherbrooke, Canada, 175 p.

- [236] Ali H. Z. M., *Effect of Accelerated Curing on Compressive strength of self – compacting concrete*, Journal of Engineering and Development, 2011, Vol. 15, N° 4, pp. 1813- 7822.
- [237] Ba M., Qian Ch., Guo X., Han X., *Effects of steam curing on strength and porous structure of concrete with low water/binder ratio*, Construction and Building Material, 2011, Vol. 25, pp. 123-128.
- [238] Ma W., Sample D., Martin R., Brown P. W., *Calorimetric Study Of Cement Blends Containing Fly Ash, Silica Fume And Slag At Elevated Temperatures*, Cement and Concrete and Aggregates, CCAGPD, Dec 1994, Vol. 16, N°2, pp. 93-99.
- [239] Bakharev T., Sanjayan J. G., Cheng Y. B., *Effect of elevated temperature curing on properties of alkali activated slag concrete*, Cement and Concrete Research, 1999, Vol. 29, N°10, pp. 1619-1625.
- [240] Mirza W., Noury S., Bedawi W., *Temperature on strength of mortars and concrete containing blended cements*, Cement and Concrete Comp., 1991, Vol. 13, pp.197–202.
- [241] Hansen W.C., *Studies relating to the mechanism by which alkali- aggregate reaction produces expansion in concrete*, Proc. Amer. Concr. Inst., 1944, Vol. 40, pp. 213-227.
- [242] PROC, Seventh international congress on the chemistry of cement, 1980, Paris.
- [243] Specification for Portland blast furnace cement, British Standards Institution, 1973, Part 2, London, 7 p.
- [244] Mannan M. A., Basri H. B., Zain M. F. M., Islam M. N., *Effect of curing conditions on the properties of OPS-concrete*, Build Environ, 2002, Vol. 37, pp. 1167-1171.
- [245] Dent G. I. S., Kataok A., *The Chemistry of Alkali- Aggregate Reaction*, Cement and Concrete Research J., 1981, Vol.11, pp. 1-9.
- [246] Tan O. E., Gjorv, *Performance of concrete under different curing conditions*, Cement and Concrete Research, 1996, Vol. 26, N° 3, pp. 355-361.
- [247] Gidion T., Marios N. S., *Supplementary cementitious materials: strength development of self-compacting concrete under different curing temperature*, The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), Procedia Engineering, 2015, Vol. 125, pp. 699 - 704.

- [248] Aggoun A., Yurtdas I., Berthet J. F., Li A., *Influence de la température sur le comportement mécanique des bétons autoplaçants*, Source : <http://laego.inplnancy.fr/fileadmin/AUGC08/Communications/BETONS%20AUTOPLACANTS/71-Aggoun-AUGC2008.pdf>.
- [249] Reinhardt H. W., Stegmaier M., *Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of SCC*, Cement and Concrete Research, 2006, Vol. 36, N° 5, pp. 879-885.
- [250] Aparicio S., Martínez-Ramírez S., Ranz J., Fuente J. V., Hernández M. G., *Microstructural and mechanical properties study of the curing process of self-compacting concrete*, Material Des., 2016, Vol. 94, pp. 479-486.
- [251] Gesoğlu M., *Influence of steam curing on the properties of concretes incorporating metakaolin and silica fume*, Materials and Structures, 2010, Vol. 43, pp.1123–1134.
- [252] Boukni B., *Contribution à l'étude expérimentale du comportement thermomécanique des bétons autoplaçants*, Thèse de Doctorat, 2012, Université Mentouri Constantine, Algérie.
- [253] Chopin D., Francy O., Lebourgeois S., Rougeau P., *Creep and shrinkage of heat-cured SCC*, Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003, Reykjavik, Islande, pp. 672-683.
- [254] Kim K. J., Sang H. H., Young C. S., *Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete. Part I. Experimental results*, Cement and Concrete Research, 2002, Vol. 32, pp. 1087-1094.
- [255] Mouret M., *Contribution à l'étude des phénomènes d'altération des résistances des bétons confectionnés par temps chaud*, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, 1997, France.
- [256] Zevcovic S. D., *The effect of increased temperature on fresh and hardened concrete - Concreting in hot climates*, Edited by Walker M. J., E & FNB, 1989, London, pp. 3-12.
- [257] Mouret M., Bascoul A., Escadeillas G., *Strength impairment of concrete mixed in hot weather: analysis in relation to physical and chemical properties of hardened concrete*, Magazine of Concrete Research, 2005, Vol. 57, N° 5, pp. 301-308.



- [258] Gallucci E., Xinyu Z., Scrivener K., *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 (RF)<sup>2</sup> B., 19-20 juin 2006, Toulouse, France.
- [259] Ho D., Cao T., *Water sorptivity of steam cured concrete*, CIA (NSW) seminar on the structural use of precast concrete, 1994, Concrete Institute of Australia, 10 p.
- [260] Boel V., Audenert K., Schutter G. D., *Gas permeability and capillary porosity of self-compacting concrete*, Materials and Structures, 2008, Vol. 41, pp. 1283-1290.
- [261] El-Chabib H., Ibrahim A., *The performance of high-strength flowable concrete made with binary, ternary, or quaternary binder in hot climate*, Construction and Building Materials, 2013, Vol. 47, pp. 245-253.
- [262] Turkel S., Alabs V., *The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete*, Cement and Concrete Research, 2005, Vol. 35, N° 2, pp.405-411.
- [263] Carino N. J., Lew H. S., *Temperature effect on strength-maturity relations of mortars*, ACI Journal, May 1983, Vol. 80, N° 3, pp.177-182.
- [264] Nguyen T. S., *Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires*, Thèse de Doctorat, 2006, INSA de Toulouse, France.
- [265] Ferhat Bingol A., Tohumcu I., *Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self-compacting concrete incorporating fly ash and silica fume*, Material and Design, 2013, Vol. 51, pp.12-20.
- [266] Brooks J. J., Kaisi A. F., *Early strength development of Portland and slag cement concretes cured at elevated temperature*, ACI Mater J., 1990, Vol. 87, N° 5, pp. 503-510.
- [267] Videla C. C., Covarrunbias J. P. T., Pascal J. M. D., *Behavior in extreme climates of concrete made with different types of cement*, In: DhiRK, McCarty M J, editors, 1996, Appropriate concrete technology, pp. 213–241.
- [268] Monzo J., Borrachero M. V., *Mechanical treatment of fly ashes: strength development and workability of mortars containing ground fly ashes*, Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on fly Ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in Concrete, 1995, Milwaukee, Wisconsin, USA, pp. 339-353.

- [269] Pratas J. D., *Early age strength development of slag cement concretes*, Msc. Dissertation, 1978, University of Leeds, England.
- [270] Berkani A., *Etude de l'activation thermique des additions minérales sur les caractéristiques mécaniques d'un mortier de ciment normalisé*, Mémoire de Master, 2015, Université de Médéa, Algérie.
- [271] Behim M., Julien S., Habita M. F., Clastres P., *Durabilités des pâtes de ciments contenant du laitier d'El-Hadjar conservées dans des milieux agressifs et à des températures de climat chaud*, CITDUB 1, 24-26 mai 2004, BabEzzouar, 13 p.
- [272] Weisheit S., Waldmann N., Reger A., *Influence of environmental conditions on the rheological properties of SCC*, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 2010, Montréal, Canada, pp. 453-460.
- [273] NF EN 196-6, 2012, *Méthodes d'essai des ciments - Partie 6 : détermination de la finesse*, AFNOR.
- [274] NF EN 196-3, 2017, *Méthodes d'essai des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité*, AFNOR.
- [275] NF EN 196-1, *Méthodes d'essais des ciments. Partie 1: Détermination des résistances mécaniques*, 2016, AFNOR.
- [276] Boukendakdji M., *Mechanical Properties and Long-Term Deformation of Slag Cement Concrete*, PhD Thesis, 1989, University of Leeds, UK.
- [277] Wainwright P. J., Rey N., *The influence of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete*, Cement & Concrete Composites, 2000, Vol. 22, pp. 253-257.
- [278] NF EN 933-1, *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage*, 1997, AFNOR.
- [279] NF EN 1097-6, *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*, 2001, AFNOR.

- [280] NF EN 1097-3, *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*, 1998, AFNOR.
- [281] NF EN 933-8, *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable*, 1999, AFNOR.
- [282] NF EN 1097-2, *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2: Méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation*, 2001, AFNOR.
- [283] NF EN 1008, *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*, 2003, AFNOR.
- [284] Domone P. L., Jin J., *Properties of mortar for self-compacting concrete*, Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, 13-15 September 1999, Stockholm, Sweden, pp. 109-120.
- [285] Boukendakdji O., Kadri E. H., Kenai S., *Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete*, Cement and Concrete Composites, 2012, Vol. 34, pp. 583-590.
- [286] Belaidi A. S. E., *Contribution à l'étude rhéologique et durabilité des BAP: Apport des ajouts cimentaires ternaires et des fillers locaux et industriels*, Thèse de doctorat, 2013, Université de Blida, 192 p.
- [287] Benabed B., *Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants*, Thèse de doctorat, 2014, Université Amar Telidji De Laghouat, 226 p.
- [288] Bensebti S., *Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux*, Thèse de doctorat de l'Université de Mentouri-Constantine, 2008, Algérie.
- [289] Belaidi A. S. E., Azzouz L., Kadri E. H., Kenai S., *Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, 2012, Vol. 31, pp. 251-257.
- [290] Kouider Djelloul O., *Effet du laitier sur le comportement rhéologique d'un béton autoplaçant*, Mémoire de Magister, 2012, Université Saad Dahleb de Blida, Algérie.

- [291] Itim, A., Ezziane K., and Kadri, E. H., *Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions*, Construction and Building Material, 2011, Vol. 25, pp. 3603-3609.
- [292] Khayat K. H., Pavate T., Assad J., *Analysis of Variations in Electrical Conductivity to Assess Stability of plastic Cement-Based Materials*, ACI Materials J., 2003, Vol. 4, N° 100, pp. 342-350.
- [293] Edamatsu Y., Nishida N., Ouchi M., *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, 1999, Stockholm, Suede, pp. 309-320.
- [294] Pedersen B., Smeplass S., *The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase*, Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003, Reykjavik, Island, pp. 106-116.
- [295] Ozer B., Ozkul M. H., *The influence of initial water curing on the strength development of ordinary portland and pozzolanic cement concretes*, Cement and Concrete Research, 2004, Vol. 1, pp. 1-6.
- [296] Salhi M., Ghrici M., Li A., Bilir T., *Effect of curing treatments on the material properties of hardened self-compacting concrete*, Advances in Concrete Construction, 2017, Vol. 5, N° 4, pp. 359-375.
- [297] Yazici H., Yardimci M. Y., Aydin S., Karabulut A. S., *Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes*, Construction and Building Materials, 2009, Vol. 23, pp. 1223–1231.
- [298] Bendjillali K., *Comportement physico-mécanique du béton en zones arides : Apport du traitement de cure en climat réel de Laghouat*, Thèse de magister, 2011, Université de Laghouat, Algérie.
- [299] Ezziane K., Bougara A., Kadri A., Khelafi H., Kadri E. H., *Compressive strength of mortar containing natural pozzolana under various curing temperature*, Cement & Concrete Composites, 2007, Vol. 29, pp. 587–593.
- [300] Nawa T., Izumi T., Edamatsu Y., *State-of-the-art-report on materials and design of self-compacting concrete*, Proc. of Int. Workshop on Self-compacting Concrete, 1998, Kochi University of Technology, Japan, pp. 166-190.

- [301] Chai H., *Design and testing of SCC*, Ph.D Thesis, 1998, University College of London (UCL), 259 p.
- [302] Soualhi H., Kadri E. H., Ngo T. T., Bouvet A., Cussigh F., Kenai S., *A new vane rheometer for fresh mortar: development and validation*, Applied Rheology, 2014, Vol. 24, N°: 2, pp. 2259-2263.
- [303] Soualhi H., Kadri E. H., Ngo T. T., Bouvet A., Cussigh F., Tahar Z. E. A., *Design of portable rheometer with new vane geometry to estimate concrete rheological parameters*, Journal of Civil Engineering and Management, 2017, Vol. 23, N°: 3, pp. 347–355.
- [304] Adjoudj M., Ezziane K., Kadri E. H., Ngo T. T., Kaci A., *Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer*, Construction and Building Materials, 2014, Vol. 70, pp. 549–559.
- [305] NF EN 196-9, *Méthodes d'essais des ciments. Partie 9 : Chaleur d'hydratation – Méthode semi-adiabatique*, 2010, AFNOR.
- [306] NF EN 206-9, *Béton, Partie 9: Règles complémentaires pour le béton autoplaçant*, 2010, AFNOR.
- [307] NF EN 12350-8, *Essai pour béton frais - Partie 8 : béton autoplaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams*, 2010, AFNOR.
- [308] Ozawa K., Maekawa K., Okamura H., *Development of high performance concrete*, Journal of the Faculty of Engineering, 1992, Université de Tokyo, Vol. 41, N° 3, pp. 381-439.
- [309] NF EN 12350-10, *Essai pour béton frais - Partie 10 : béton autoplaçant - Essai à la boîte en L*, 2010, AFNOR.
- [310] NF EN 12350-11, *Essai pour béton frais - Partie 11 : béton autoplaçant - Essai de stabilité au tamis*, 2010, AFNOR.
- [311] NF EN 12350-6, *Essai pour béton frais. Partie 6 : Masse volumique*, 2012, AFNOR.
- [312] NF EN 12390-3, *Essai pour béton durci. Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes*, 2003, AFNOR.

- [313] NF EN 12390-5, *Essai pour béton durci. Partie 5 : Résistance à la flexion des éprouvettes*, 2001, AFNOR.
- [314] NF EN 12504-4, *Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son*, 2005, AFNOR.
- [315] Modulus of elasticity of concrete in compression, 1975, RILEM TC, RILEM, pp. 25 – 27.
- [316] Ginette A., Hugues H., *GranDuBé : Grandeurs associées à la durabilité des bétons*, Association française de génie civil, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2007, Paris, France.
- [317] *Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité*, Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM, *Durabilité des bétons*, Toulouse, France.
- [318] NF P18-459, *Béton - Essais pour béton durci – Essai de porosité et de masse volumique*, 2010, AFNOR.
- [319] Esping O., *Effect of limestone filler BET (H<sub>2</sub>O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research, 2008, Vol. 38, pp. 938-944.
- [320] Yahiaoui W., Kenai S., Menadi B., Kadri, E. H., *Durability of self-compacted concrete containing slag in hot climate*, Adv. In Concrete Constr., 2017, Vol. 5, N°: 3, pp. 271-288.
- [321] Juenger M. C. G., Siddique R., *Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete*, Cement Concrete Res., 2015, Vol. 78, pp. 71-80.
- [322] Bellifa S., *Evolution de la porometrie des pates autoplaçantes*, Mémoire de Magister, 2012, Université Aboubeker belkaid, Tlemcen, Algérie, 175 p.
- [323] Adjouj M, *Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton*, Thèse de Doctorat, 2012, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, Algérie.

- [324] Shi Y. X., Matsui I., Guo Y. J., *A study on the effect of fine mineral powders with distinct vitreous contents on the fluidity and rheological properties of concrete*, Cement and Concrete Research, 2004, Vol. 34, pp. 1381–1387.
- [325] Taleb O., *Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux*, mémoire de magister, 2009, Université de Tlemcen, Algérie.
- [326] Park C. K., Noh M. H., Park T. H., *Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures*, Cement and concrete research, 2005, Vol. 35, pp.842–849.
- [327] Gesoglu M., Özbay E., *Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems*, Materials and Structures, 2007, Vol. 40, pp. 923–937.
- [328] Şahmaran M., Özkan, N., Keskin S. B., Uzal B., Yaman İ. Ö., Erdem T. K., *Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts*, Cement and concrete research, 2008, Vol. 38, N° 7, pp. 930 –937.
- [329] Hallal A., Kadri E. H., Ezziane K., Kadri A., Khelafi H., *Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste*, Construction and building materials, 2010, Vol. 24, N° 8, pp.1418–1423.
- [330] Saak A. W., Jennings H. M., Shah S. P., *A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow*, Cement and Concrete Research, 2004, Vol. 34, N° 3, pp.363-371.
- [331] Schwartzentruber L., Le Roy R., Cordin J., *Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a self-compacting concrete (SCC)*, Cement and Concrete Research, 2006, Vol. 36, N° 7, pp.1203-1213.
- [332] Boukhelkhal Dj., Boukendakdji O., Kenai S., Kadri E. H., Bachene S., *Effect of Mineral Admixtures Type on Stability an Rheological Properties of Self-Compacting Concrete*, 5<sup>ème</sup> Séminaire International Innovation et Valorisation en Génie Civil et Matériaux de Construction INVACO'2016, 15 et 16 Décembre 2016, Hammamet, Tunisie.
- [333] Boubekeur T., *Vérification du principe de la maturité en présence d'un ciment composé durcissant sous une température variable*, Thèse de Doctorat, 2015, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, Algérie.

- [334] Belaribi O, *Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane*, Thèse de Doctorat en cotutelle, 2015, Université de Mostaganem, Algérie, Université de Cergy Pontoise, France, 175 p.
- [335] Kadri E. H., Duval R., *Effect of ultrafine particles on Heat of Hydration of Cement Mortars*, ACI Materials Journal, March-April 2002, pp. 138-142.
- [336] Schöler A., Lothenbach B., Winnefeld F., Zajac M., Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder, *Cement and Concrete Composites*, 2015, Vol. 55, pp. 374-382.
- [337] Hadj-sadok A., Kenai S., Courard L., Darimont A., *Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag*, *Construction and Building Materials*, 2011, Vol. 25, pp. 1018-1025.
- [338] Boubekour T., Ezziane K., Kadri E-H., *Estimation of mortars compressive strength at different curing temperature by the maturity method*, *Construction and Building Materials*, 2014, Vol. 71, pp. 299-307.
- [339] Bougara A., Ezziane K., Kadri A., *Prédiction des résistances du ciment au laitier durcissant sous une température*, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2001, Vol. 28, pp.555-561.
- [340] Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M., *Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements*, *Cement and Concrete Composites*, 2007, Vol. 29, pp. 542-549.
- [341] Hadj Sadok A., *Caractéristique mécanique et durabilité des mortiers à base de ciment au calcaire*, Thèse de Doctorat, 2012, Université Hassiba Ben Bouali, Algérie.
- [342] Austin S. A., Robins P. J., *Performance of slag concrete in hot climates*, *Proceedings of Concrete in Hot Climates*, 1993, pp.129- 139.
- [343] Rompay G. V., *Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré*, Thèse de Doctorat, 2007.
- [344] Battagin A. F., in 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, Indi, 1992, Vol. 3, N° 4, pp. 166-172.
- [345] Rose J. H., *The influence of curing temperature on the strength of concrete containing granulated blast furnace slag*, Ref 4, pp. 445-466.



- [346] Luke K., Glasser F. P., *Selective dissolution of hydrated blast furnace slag cements*, Cement and Concrete Research, 1987, Vol. 17, N° 2, pp. 273–82.3 .
- [347] Kejin W., Zhi G., *Evaluating properties of blended cements for concrete pavements*, Final report, 2013, Center for Portland Cement Concrete Pavement Technology: Iowa State University.
- [348] Shoukry N., Gergis W. W., Downie B., Riad M. Y., *Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete*, Construction and Building Materials, 2011, Vol. 25, pp. 688–696.
- [349] NF EN 1352, *Détermination du module d'élasticité statique en compression du béton cellulaire autoclavé et du béton de granulats légers à structure ouverte*, 1997, AFNOR.
- [350] Bouikni A., *Comportement du béton a base du laitier d'El-Hadjar sous différentes cures*, Thèse de Doctorat d'état en Génie Civil, Ecole Nationale Polytechnique, 2010, Alger, Algérie.
- [351] Swamy R. N., Mahmud H. B., *Mix proportions and strength characteristics of concrete containing 50 per cent low-calcium fly ash*, ACI publ SP -91, 1998, Vol. 1, pp. 413-432.
- [352] Whitehurst, E.A, *Soniscopes tests concrete structures*, Journal of the ACI, 1951, Vol. 47, pp. 443-447
- [353] Mucteba U., Mansur S., *Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures*, Construction and Building Materials, 2011, Vol. 25, pp. 4112–4120.
- [354] Turkmen I., Alioz A., Cuneyt A., *Characteristics of workability, strength, and ultrasonic pulse velocity of SCC containing zeolite and slag*, Scientific Research and Essays J., 2010, Vol. 5, N°: 15, pp. 2055-2064.
- [355] Abbasi A. F., *Effect of hot weather on pulse velocity and modulus of elasticity of concrete*, Materials and Structures J., 1990, Vol. 23, pp.334-340.
- [356] Tharmaratnam K., Tan B. S., *Attenuation of Ultrasonic Pulse in Cement Mortar*, Cement and Concrete Research, 1990, Vol. 20, pp. 335–40.

- [357] Ulucan Z. C., Turk K., Karatas M., *Effect of mineral admixtures on the correlation between ultrasonic velocity and compressive strength for self-compacting concrete*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2008, Vol. 44, N°5, pp. 367–74.
- [358] Demirboğa R., Türkmen I., Karakoç M. B., *Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral admixed concrete*, Cement and Concrete Research, 2004, Vol. 34, N° 12, pp. 2329-2336.
- [359] Ho D. S., Chirgwin G. J., Mak S. L., *Water sorptivity of heat-cured concrete for bridge structures*, In: Proceedings of third CANMET/ACI international conference on advances in concrete technology, 1997, Auckland, pp. 97–108.

# **ANNEXES**

## Annexe A : Fiche technique du superplastifiant

## NOTICE TECHNIQUE

**MEDAFLOW 145**

Conforme à la norme NF EN 934-2 : TAB 1, TAB 3.1  
ET TAB 3.2 NA 774

Super plastifiant–Haut réducteur d'eau

**DESCRIPTION**

Le **MEDAFLOW 145** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité. Le **MEDAFLOW 145** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

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

Le **MEDAFLOW 145** ne présente pas d'effet retardateur.

**CARACTERISTIQUES**

- Forme .....Liquide
- Couleur .....brai clair
- pH ..... 5 – 6
- Densité..... 1.065 ± 0,015
- Teneur en chlore..... < 1g/L
- Extrait sec..... 30±1,5%

**PROPRIETES ET EFFETS**

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 145** permet :

**Sur béton frais :**

- l'obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- de faciliter la mise en œuvre du béton

**Sur béton durci :**

- bonne résistances initiale et finales .
- de diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- de diminuer le retrait

**DOMAINES D'APPLICATION**

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons avec ferrailage dense

**DOSAGE****Plage de dosage recommandée :**

0,3 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.33 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment.

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

**MODE D'EMPLOI**

Le **MEDAFLOW 145** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 60% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.

Par temps chaud, le **MEDAFLOW 145** peut être combiné à un retardateur de prise **MEDARETARD GR**.

**CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE**

Le **MEDAFLOW 145** est conditionné en bidons de 10 l et fûts de 210 et 240 kg. et cubitainer 1100 kg

**Délai de conservation :**

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

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



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

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

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



86

**Annexe B** : Exemple de calcul de la composition du mortier autoplaçant.

### B.1. LES DONNEES :

Pour un volume du mortier de  $V=1.31$  (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment :  $\rho_C=3150 \text{ kg/m}^3$
- Sable :  $\rho_S=2630 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant :  $\rho_{Sp}=1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau :  $\rho_E=1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable  $A_b= 1.2$

On fixe le rapport Sable/Mortier  $S/M = 0.50$  (Par exemple)

On fixe le rapport (par poids)  $E/C = 0.55$  ou (par volume)  $E/C = 1.7325$

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) il est de 30% extrait (il contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de :  $\%Sp = 1\%$  du poids de ciment (ou poudres).

### B.2. CALCUL D'HUMIDITE DU SABLE :

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse  $M_1=321\text{gr}$  (par exemple), on le met dans l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 8 minute puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse  $M_2 = 320\text{gr}$  et on calcul l'humidité du sable  $\mu_s$

$$\mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

$$\text{Correction} = \mu_s - A_b$$

### B.3. CALCUL DES QUANTITES DE CHAQUE CONSTITUANT :

#### B.3.1. Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment %C:

$$\%C_{vol} = \frac{(I - S/M)}{(I + E/C_{par\ volume})} * 100$$

La quantité de ciment  $C$  en kg:

$$C(kg) = \frac{V \times E / C_{par\ volume}}{100} \times \rho_c$$

#### B.3.2. Le Sable

La quantité du sable en kg est S

$$S(kg) = \left(1 + \frac{Correction}{100}\right) \times \left(\frac{V \times S / M \times \rho_s}{100}\right)$$

#### B.3.3. Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est  $Sp$  :

$$Sp(kg) = \frac{\%Sp \times C}{100}$$

### B.3.4. L'eau

L'eau ajoutée au mortier ( $E$ ) est divisée en deux parties : une première partie  $E_1$ , qui est de 80% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité  $E_2$  (20% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté 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 :

$$E = \left( \frac{V \times \%E_{vol}}{100} \times \frac{\rho_E}{1000} \right) - \left( \frac{Sp \times 70}{100} \right) - \left( \frac{V \times S / M \times \rho_s}{1000} \times \frac{correction}{100} \right)$$

**Eau1**

$$E_1 = E \times 0.70$$

**Eau2**

$$E_2 = E \times 0.30$$

---

**Annexe C : Exemple de calcul de la composition du béton autoplaçant.**

Les mêmes démarches de la composition du mortier (*ANNEXE A*) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant

**C.1. LES DONNEES**

- Pour un volume de béton de  $V=20$  litres (par exemple)
- **Masses volumiques**
  - Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) :  $\rho_G = 1426 \text{ kg/m}^3$
  - Masse volumique absolue du gravier (gravier roulé) :  $\rho_{AG} = 2560 \text{ kg/m}^3$
  - Masse volumique absolue du sable :  $\rho_S = 2630 \text{ kg/m}^3$
  - Masse volumique absolue du ciment :  $\rho_C = 3150 \text{ kg/m}^3$
- **Coefficients d'absorption**
  - Coefficient d'absorption du sable :  $A_{bS} = 1.2$
  - Coefficient d'absorption du sable :  $A_{bG} = 2.18$
  - Le rapport Sable/Mortier :  $S/M = 0.40$
  - 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  $E/C_{\text{volume}}=1.419$  par unité de volume de ciment et  $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volum}} / \rho_A = 0.45$  par unité de poids de ciment.
- Le pourcentage de superplastifiant (**MEDAFLOW30**) :  $\%Sp= 1\%$  du poids de ciment, le **MEDAFLOW30** est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau)



## C.2. CALCUL D'HUMIDITE

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 6minutes pour le gravier et une durée de 8minutes pour le sable, puis on pèse  $M_2$  et  $M'_2$  les masses respectives du gravier et du sable.

$$\text{L'humidité du sable : } \mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

$$\text{L'humidité du gravier : } \mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$$

## C.3. CALCUL DES DIFFERENTS COMPOSANTS

### C.3.1. Gravier

La quantité  $G$  en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton  $V$  :

$$G(\text{kg}) = \frac{G(\text{kg} / \text{m}^3) \times V}{1000} \left( 1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

### C.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 dans le béton :

$$\%G = \frac{G(\text{kg} / \text{m}^3)}{\rho_{AG}} \times 10$$

Le pourcentage du volume de mortier par rapport au volume de béton :

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable 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

### C.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 :

$$C(kg) = \%C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

### C.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 :

$$Sp(kg) = Sp(kg/m^3) \times V$$

### C.3.5. Eau :

L'eau ajoutée au béton ( $E$ ) est divisée en deux parties : 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 contenu 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  $V$  de béton :

$$E(kg) = \frac{\%E \times 10 \times V}{1000} - e$$

Avec :

**Eau1**

$$E_1(kg) = 0.70 \times E$$

**Eau2**

$$E_2(kg) = 0.30 \times E$$

---

## Annexe D : Exemple de calcul des paramètres rhéologiques

### D.1. Déroulement de l'essai

1<sup>ère</sup> étape : avant la réalisation des essais, il faut faire chauffer le rhéomètre en le faisant fonctionner suffisamment à la vitesse maximale de 400 tours/min.

2<sup>ème</sup> étape : mesurer ensuite les couples à vide ( $M_{\text{vide}}$ ) correspondant aux vitesses imposées selon le profil présenté sur la figure 2.23;

3<sup>ème</sup> étape : remplir le mortier jusqu'à l'arase du récipient et mettre en place et centrer le croisillon de sorte que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arase du récipient; mesurer les couples totaux correspondants aux vitesses imposées ( $M_{\text{total}}$ ).

4<sup>ème</sup> étape : exploiter les mesures des couples ( $M$ ) en fonction de vitesse imposée. Les couples  $M$  sont obtenus en faisant la différence entre  $M_{\text{total}}$  et  $M_{\text{vide}}$ .

### D.2. Mesure des paramètres rhéologiques

Pour mieux visualiser le fonctionnement du rhéomètre et la déduction des paramètres rhéologiques des différents mortiers, on présentera comme exemple, une application sur un mortier de référence contenant 100% de ciment. Le tableau D.1 récapitule les étapes de calcul suivies.

*a) Colonne 1 :*

Cette colonne représente le profil de vitesse imposé pour le rhéomètre. Ce profil a été choisi sur la base de recherches précédentes [304], dans lesquelles ce dernier présente plus de stabilité des résultats.

*b) Colonne 2 :*

Les vitesses du profil de vitesse seront reconverties en rad/s et récapitulées dans la colonne 2.

*c) Colonne 3 :*

Les moments  $M_{\text{vide}}$  enregistrés par le rhéomètre sont représentés sur la colonne 3. Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est vide.

d) Colonne 4 :

Les moments totaux  $M_{\text{plein}}$  enregistrés par le rhéomètre sont représentés sur la colonne 4. Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est rempli de mortier.

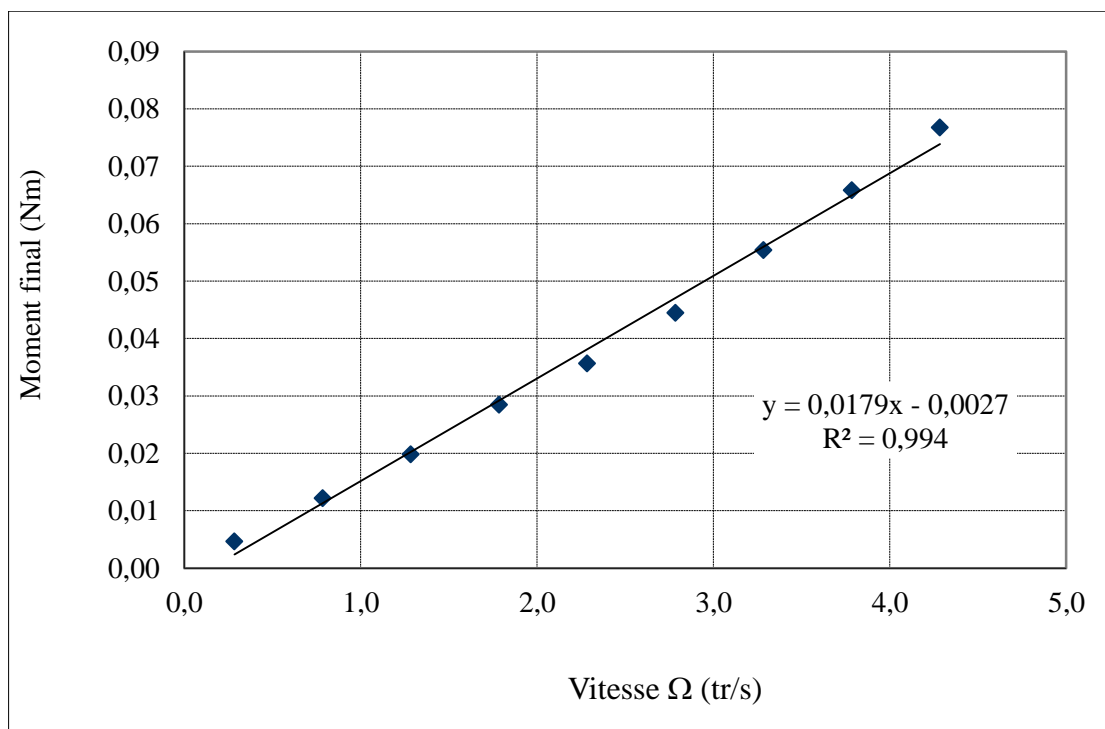
e) Colonne 5 :

Dans cette colonne sont calculés les moments finaux. Ils s'obtiennent par la différence entre les moments à l'état plein et les moments à l'état vide pour chaque palier de vitesse.

$$M_{\text{final}} = M_{\text{plein}} - M_{\text{vide}} \quad \text{D.1}$$

f) Colonne 6 :

La variation du moment final, en fonction de la vitesse de rotation, est ajustée linéairement et des nouvelles valeurs du moment sont déduites. La figure D.1 illustre la corrélation linéaire obtenue à partir de laquelle les moments linéarisés  $M_l$  seront calculés et regroupés dans la colonne 6.



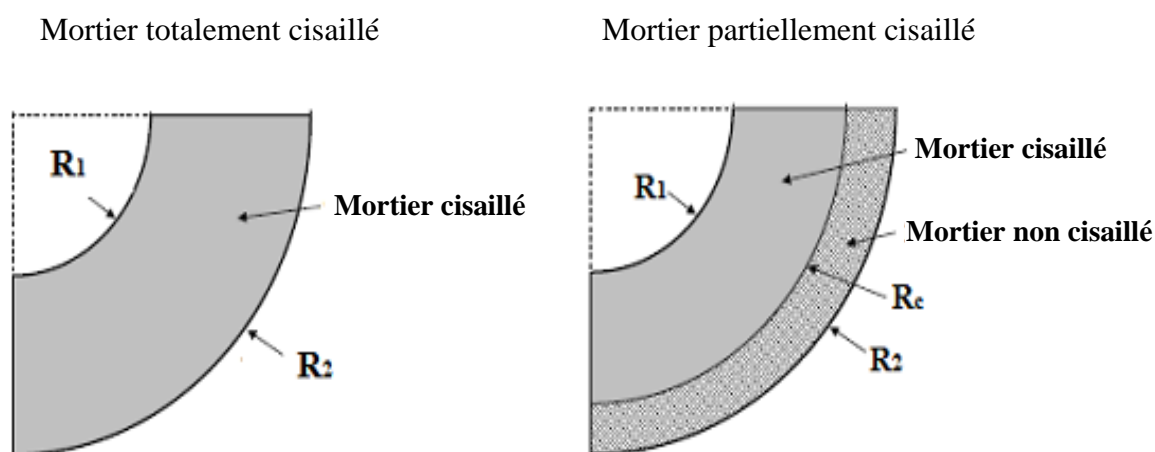
**Figure D.1.** Linéarisation des moments finaux en fonction de la vitesse de rotation.

g) *Colonne 7 :*

La relation contrainte-vitesse de cisaillement dans une géométrie couette est établie en considérant localement le fluide en écoulement comme étant un fluide de Bingham.

Pour un tel fluide, l'expression de la vitesse de cisaillement dépend du régime d'écoulement dans l'entrefer. Ainsi, la vitesse de cisaillement s'exprime par l'équation D.2 lorsque le mortier est partiellement cisailé comme le montre la figure D.2.a et dont les résultats trouvés sont présentés sur la colonne 7.

$$\dot{\gamma}_1 = 2M \frac{\partial \Omega}{\partial M} \quad \text{D.2}$$



**Figure D.2.** Schéma du cisaillement du mortier dans le récipient.

h) *Colonne 8 :*

Lorsque le mortier est totalement cisailé, comme illustré sur la figure D.2.b, l'expression de la vitesse de cisaillement est donnée par l'équation 3.3. Les valeurs trouvées pour chaque vitesse de rotation sont récapitulées dans la colonne 8.

$$\dot{\gamma}_2 = 2 \frac{M \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}} - \frac{\Omega - M \frac{\partial \Omega}{\partial M}}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \quad \text{D.3}$$

*i) Colonne 9 :*

Dans la colonne 9, on combine entre les deux expressions des vitesses de cisaillement qui gouvernent l'écoulement dans le récipient. La valeur convenable de la vitesse de cisaillement est celle entraînant plus de dissipation d'énergie. Donc, la vitesse de cisaillement peut être donnée par l'équation 3.4 où les valeurs trouvées sont récapitulées dans la colonne 9.

$$\dot{\gamma} = \max (\dot{\gamma}_1 ; \dot{\gamma}_2 ) \quad \text{D.4}$$

*j) Colonne 10 :*

Dans la colonne 10, on calcule la contrainte de cisaillement dans le mortier à partir du moment appliqué et les dimensions du croisillon. Pour un calcul simplifié on trouve :

$$\tau = \frac{M_l}{2 \pi R^2 h} \quad \text{D.5}$$

*j) Colonne 11 :*

Sur un palier de vitesse de cisaillement, on peut évaluer le cisaillement moyen par l'expression 3.6. La colonne 11 regroupe les valeurs trouvées pour chaque vitesse de cisaillement.

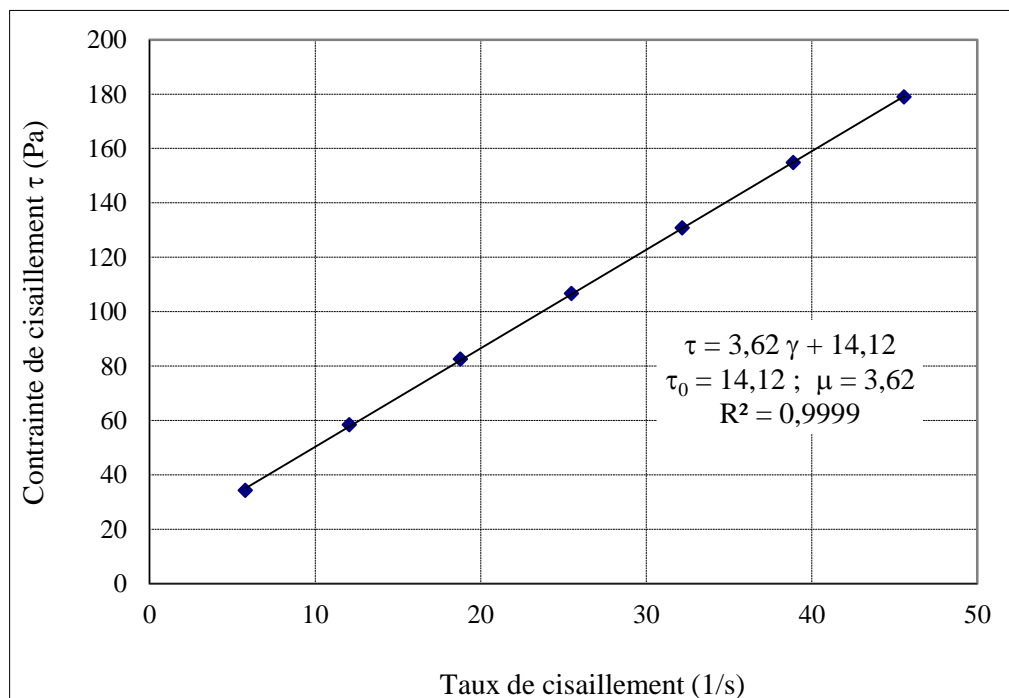
$$\tau_{moy} = \frac{1}{2} (\tau_i + \tau_{i-1}) \quad \text{D.6}$$

La courbe de tendance obtenue à partir des points  $(\tau_i - \dot{\gamma}_i)$  permet d'estimer la viscosité par la pente de la droite et le seuil de cisaillement du mortier par la contrainte correspondant à une vitesse nulle. La figure 3.11 présente la corrélation linéaire entre la contrainte et la vitesse de cisaillement où le seuil prend la valeur de 7.62 Pa et la viscosité 2.01 Ps.s pour le mortier d'étude.



**Tableau D.1.** Calcul du taux de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour un mortier témoin (100% ciment)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Omega$ (tr/s)	$\Omega$ (rad/s)	$M_{vide}$ (N.m)	$M_{plein}$ (N.m)	$M_{Total}$ (N.m)	$M_{linéarisé}$ (N.m)	$\dot{\gamma}_1$ (1/s)	$\dot{\gamma}_2$ (1/s)	$\dot{\gamma}_{max}$ (1/s)	$\tau$ (Pa)	$\tau_{moy}$ (Pa)
4,28	26,91	0,156	0,077	0,233	0,075				195,4	
3,78	23,77	0,152	0,066	0,218	0,066	43,49	45,58	45,6	167,6	179,0
3,28	20,63	0,147	0,055	0,203	0,056	37,21	38,88	38,9	141,0	154,9
2,78	17,49	0,143	0,044	0,187	0,047	30,92	32,18	32,2	113,2	130,8
2,28	14,35	0,137	0,036	0,172	0,037	24,64	25,48	25,5	90,7	106,6
1,78	11,21	0,129	0,028	0,158	0,028	18,36	18,78	18,8	72,5	82,5
1,28	8,06	0,121	0,020	0,141	0,018	12,07	12,07	12,1	50,5	58,4
0,78	4,92	0,113	0,012	0,125	0,009	5,79	5,37	5,8	31,0	34,3
0,28	1,78	0,106	0,005	0,111	-0,001	-0,49	19,07	19,1	11,8	10,2
4,28	26,91	0,159	0,072	0,231	0,075	49,77	35,14	49,8	183,1	94,6



# **PUBLICATION**

## Combined effect of mineral admixture and curing temperature on mechanical behavior and porosity of SCC

Boukhelkhal Djamila<sup>1a</sup>, Boukendakdji Othmane<sup>2b</sup>, Kenai Said<sup>\*1</sup> and Kadri El-Hadj<sup>3c</sup>

<sup>1</sup>Geomaterials Laboratory, Department of Civil Engineering, University of Blida, Blida, Algeria

<sup>2</sup>LME Laboratory, University of Medea, Medea, Algeria

<sup>3</sup>L2MGC Laboratory, University of Cergy Pontoise, Cergy Pontoise, France

(Received October 26, 2017, Revised January 28, 2018, Accepted January 30, 2018)

**Abstract.** In order to provide sufficient stability and resistance against bleeding and segregation during transportation and placing, mineral admixtures are often used in self-compacting concrete mixes (SCC). These fine materials also contribute to reducing the construction cost and the consumption of natural resources. Many studies have confirmed the benefits of these mineral admixtures on properties of SCC in standard curing conditions. However, there are few published reports regarding their effects at elevated curing temperatures. The main objective of this study is to investigate the effect of three different mineral admixtures namely limestone powder (LP), granulated blast furnace slag (GS) and natural pozzolana (PZ) on mechanical properties and porosity of SCC when exposed to different curing temperatures (20, 40, 60 and 80°C). The level of substitution of cement by mineral admixture was fixed at 15%. The results showed that increasing curing temperature causes an improvement in performance at an early age without penalizing its long-term properties. However the temperature of 40°C is considered the optimal curing temperature to make economical and high performance SCC. On the other hand, GS is the most suitable mineral admixture for SCC under elevated curing temperature.

**Keywords:** SCC; mineral admixture; curing temperature; mechanical strength; modulus of elasticity; porosity

### 1. Introduction

Self-compacting concrete offers some economical, technical and environmental advantages and hence it is widely used in many countries for different applications and structural configurations (Okamura and Ouchi 2003). This type of concrete can flow through and fill the gaps of reinforcement and corners of molds under its own weight without any need for vibration and compaction during the placing process with no segregation or excessive bleeding. These characteristics make it suitable for precast applications and heavily reinforced sections. Therefore, the self-compaction characteristics of SCC result in a more reliable quality in concrete placement

\*Corresponding author, Professor, E-mail: [sdkenai@yahoo.com](mailto:sdkenai@yahoo.com)

<sup>a</sup>Ph.D. Student, E-mail: [boukelkal\\_djamila@yahoo.fr](mailto:boukelkal_djamila@yahoo.fr)

<sup>b</sup>Professor, E-mail: [boukendakdji\\_o@yahoo.fr](mailto:boukendakdji_o@yahoo.fr)

<sup>c</sup>Professor, E-mail: [el-hadj.kadri@u-cergy.fr](mailto:el-hadj.kadri@u-cergy.fr)

and a more homogeneous material structure; minimize the concrete void spaces and have uniform surface texture, improved durability, high strength, and faster construction (Persson 2001).

SCC are characterized by high paste content and for economic and environmental reasons, mineral admixtures are often used in this concrete. Limestone powder (LP), granulated blast furnace slag (GS), fly ash (FA) and naturel pozzolana (PZ) are the most frequently used mineral admixture in SCC. Several studies have confirmed that the incorporation of these fine materials which are generally waste or industrial by-product (reactive or inert) can not only reduces total material cost, but also result in considerable benefits to the environment. In addition, they can enhance the workability and rheological properties of SCC, reduce heat of hydration, contribute to the strength development of concrete and make it more durable (Chore and Joshi 2015, Kangkang *et al.* 2015, Deepankar *et al.* 2016, Rakesh and Bibhuti 2016, Lenka and Panda 2017, Yahiaoui *et al.* 2017).

Boukendakdji *et al.* (2012) reported that, replacing 15% of cement content by GS in SCC increases the workability, reduces the need of superplasticizer (SP) necessary to obtain a similar slump flow compared with the concrete containing only cement as binder and gives a similar long-term strength as reference concrete. Moreover, Hadjsadok *et al.* (2011) found that mechanical properties and durability of slag concrete is improved at long term for low water/binder ratio (0.42) concrete and the sulfate attack resistance is achieved by slag replacement up to 30%.

Limestone powder (LP) is one of the extensively materials studied in literature. It has shown that it improves the workability and viscosity of SCC, as well as reduces its porosity with excellent densification of concrete microstructure (Hallal *et al.* 2010). Furthermore, the study on durability of concrete incorporating LP by Menadi *et al.* (2009) found a reduction in water permeability for concrete containing 15% of limestone fines as replacement of crushed sand.

The effect of PZ as a mineral admixture in SCC was also studied by several researchers; it is well established that due to its pozzolanic activity, this mineral admixture shows a beneficial contribution in improving the durability characteristics and ultimate strength of concrete (Belaidi *et al.* 2012). Ghrici *et al.* (2007) found an enhancement in acid and sulfate attack resistance as well as resistance to chloride ion penetration for cement mortar with natural pozzolana. The resistance of concrete with natural pozzolana in sodium sulfate and acid attacks has also been proved by Siad *et al.* (2013).

On the other hand, mixing mineral admixtures as ternary or catenary blended cement in concrete lead to better performances as reported by several researchers. Results of Ghrici *et al.* (2007) showed that the use of ternary blended cement (C+20% LP+30% PZ) improves the compressive and flexural strengths at early age and at long-term. Durability was also enhanced where better resistances to sulfate, acid and chloride ions penetration were shown. Mallikarjuna and Gunneswara (2017) reported also the improvement in compressive strength by using a combination of fly ash and GS as binder in geopolymer concrete.

However, SCC may be exposed to elevate curing temperatures whether in extreme weather conditions, in massive concrete structures or as a curing process in prefabrication. It is widely reported that a high curing temperature achieves high mechanical properties at early age, but can adversely affects the strength at later ages (Pihlajavaara 1972, Kim *et al.* 2000, Kanstad *et al.* 2003). This loss in strength at later age could be due to high temperature producing hydration products with non-uniform distribution (Neville 2000, Escalante and Sharp 2001) forms an open and unfilled pore structure in concrete (Lothenbach *et al.* 2007).

The kinetic of hardening of SCC with low water/binder ratio and high mineral admixture replacement is not always equivalent to that of ordinary concrete (Ba *et al.* 2011). Research results

will differ between a reduction, stabilization and even an increase in strength at later age than curing at 20°C; which may be affected by the concrete composition, type and rate of admixtures and curing temperature. Gidion and Marios (2015), Derabla and Larbi (2014); reported that increasing curing temperature lead to smaller loss in later strength of SCC. Moreover, the study of Reinhardt and Stegmaier (2006) showed that there is no negative effect of elevated temperature on the high strength SCC, while the heat curing leads to coarser pores without increasing the total pore volume. This result is confirmed by other researchers (Aparicio 2016) who found a stabilization on microstructural and mechanical parameters after seven days for high curing temperature of SCC.

The beneficial effect of mineral admixtures on SCC properties at elevated temperatures has been shown by several investigators. It has been confirmed that the strength of concrete with mineral admixtures was higher than that of concrete without admixtures in heat curing conditions (Yazici *et al.* 2009, Bingöl and Tohumcu 2013, Ramezaniapour *et al.* 2014, Juenger and Siddique 2015, Boubekour *et al.* 2017). Moreover, other studies proved that increasing curing temperature can significantly improve the reactivity of GS and FA in concrete (Ho *et al.* 2003, Liu *et al.* 2005). Kanstad *et al.* (2003) report that high strength concretes (70 MPa) with pozzolanic admixtures i.e. silica fume (SF), FA and PZ, show no negative effect in strength while curing temperature rises from 20 to 55°C.

Other researchers studied the effect of several curing temperatures on properties of SCC. Bingöl and Tohumcu (2013) demonstrated that the optimum temperature of heat curing in SCC is 70°C. However, Ramezaniapour *et al.* (2013) found that the application of cycles with maximum temperature of 70°C decreases the durability properties of SCC, such as surface resistivity and capillary absorption. It was reported that the optimum temperature of heat curing was near 60°C considering strength and more pre-curing can increase the strength and durability as well since it may increase pozzolanic activity (Ho *et al.* 2003). As reported by Bougara *et al.* (2009), the temperature of 40°C presents the optimum curing temperature for strength development of the slag cement.

Therefore, the objective of this study is to examine the effect of substitution of 15% of the cement weight, by different mineral admixtures such as slag, pozzolana and limestone powder on mechanical properties and porosity of SCC cured under temperatures ranging between 20 and 80°C.

## 2. Experimental program

### 2.1 Materials

Local Ordinary Portland Cement type CEM I 42.5 was used. Three types of mineral admixtures were used: natural pozzolana (PZ) from a local volcanic deposit, limestone powder (LP) from a cement manufacturing quarry and granulated blast furnace slag (GS) from local steel factory. These mineral admixtures were ground in order to obtain a fine powder similar to that of common cements ( $SSB \approx 3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). Table 1 describes the chemical compositions and physical properties of Portland cement and mineral admixtures used in this study. The activity index (*i*), was determined by mechanical method according to European standard EN 196-1 on standardized mortar with 15% mineral admixture.

Two sands and two gravels were used: a siliceous fine dune sand (S1), a crushed limestone

Table 1 Chemical and physical analysis of cement and mineral admixtures

Chemical Constituent (%)	Cement	Limestone powder (LP)	Granulated slag (GS)	Natural pozzolana (PZ)
CaO	63.57	53.08	42.20	10.50
SiO <sub>2</sub>	20.18	1.42	40.10	47.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.75	0.91	6.00	17.54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.74	0.56	2.00	10.50
MgO	2.12	0.43	4.70	3.80
MnO	-	0.50	2.6	-
SO <sub>3</sub>	2.67	0.60	0.13	0.40
K <sub>2</sub> O	0.55	0.52	1.17	1.50
TiO <sub>2</sub>	-	-	1.10	-
Na <sub>2</sub> O	0.69	0.08	-	3.40
Cl	0.01	-	-	-
Loss on ignition (%)	1.72	41.90	-	4.39
Activity index at 7 days ( <i>i</i> <sub>7</sub> )	-	0.84	0.83	0.85
Activity index at 28 days ( <i>i</i> <sub>28</sub> )	-	0.88	0.91	0.88
Activity index at 90 days ( <i>i</i> <sub>90</sub> )	-	0.89	0.96	0.91
Physical properties				
Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	3.150	2.544	2.857	2.590
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3370	3560	3450	3490

Table 2 Physical and mechanical properties of fine and coarse aggregates

Properties	Sand		Gravel		Standard
	S1 (0/1)	S2 (0/4)	G1 (3/8)	G2 (8/15)	
Finess Modulus	1.06	3.45	-	-	NF EN 933-1
Specific gravity (kg/l)	2.59	2.63	2.66	2.67	NF EN 1097-6
Bulk density (kg/l)	1.42	1.53	1.37	1.34	NF EN 1097-3
Sand equivalent (%)	61.13	75.63	-	-	NF EN 933-8
Water absorption (%)	0.04	0.38	0.19	0.52	NF EN 1097-6
Los-Angeles (%)	-	-	27.92	24.60	NF EN 1097-2

sand (S2), a 3/8 gravel (G1) and an 8/15 gravel (G2) from the same quarry. The physical and mechanical properties of fine and coarse aggregates are summarized in table 2. Fig. 1 gives the grading sizes of these aggregates. In this study a polyether-polycarboxylate based superplasticizer was used with a solid content of 30% and specific density of 1.065 g/cm<sup>3</sup>.

## 2.2 Mix proportions

In order to determine the quantities of materials: cement, aggregate, water and superplasticizer, the formulations are based on the Japanese method (general method) proposed by Okamura and Ouchi (2003), with some modifications being made to the level of the sand content in the mortar

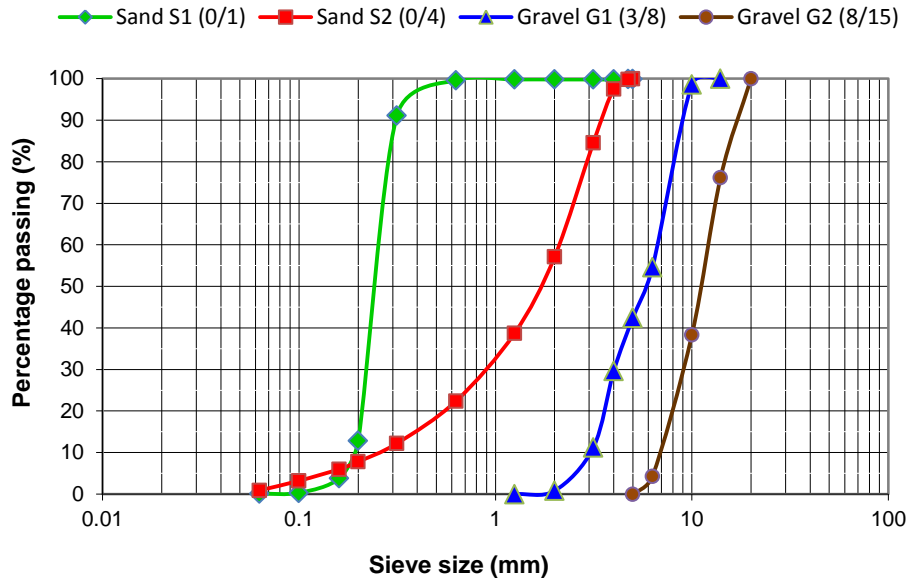


Fig. 1 Grading curves of fine and coarse aggregates used

(S/M), the water-powder weight ratio (W/P) and the superplasticizer-powder weight ratio (Sp/ P) in order to take into account the requirements of the local materials and to obtain good fresh properties of SCC.

Four self-compacting concrete mixes were made with a total powder content of  $470 \text{ kg/m}^3$  (Portland cement and mineral admixture), while keeping constant the W/P ratio at 0.42, S/M ratio at 0.50, paste volume at 34.4% (including air content of 1%) and Sp/P ratio at 1.6%. For SCC with mineral admixture, the cement was substituted by weight with 15% of mineral admixture to obtain a self-compact paste for each SCC mixture as recommended by the French Association of Civil Engineering (AFGC 2002) (the paste volume was kept constant). The 15% substitution rate was chosen as it is the average rate used in most local cement manufacturing companies and also based on previous work which showed that this is the optimal rate (Itim *et al.* 2011, Boukendakdji *et al.* 2012, Belaidi *et al.* 2012). The mix proportions of the produced mixtures (for  $1 \text{ m}^3$  by weight) are shown in Table 3.

### 2.3 Manufacturing and tests

All concrete batches are manufactured in the laboratory environment by a rotary planetary mixer with the capacity of  $50 \text{ dm}^3$  and all components of SCC mixture were batched by weight. In order to ensure a good homogeneity of concrete mixes and a better dispersion of fine particles by the superplasticizer, mixing process for SCC was longer than that for conventional concrete mixes, and superplasticizer were diluted in water before added to the concrete (Chopin *et al.* 2004). Therefore, the following mixing procedure consisted in mixing the coarse and fine aggregates with the cement and mineral admixture together for half a minute (30 s), then the amount of 60% of mixing water and mixed for 1 min before adding the remaining 40% of water containing the superplasticizer during another 1 min. The mixing is continued for another 5 minutes and then

Table 3 Mix proportions for studied SCC mixes

Constituent (kg/m <sup>3</sup> )	SCC-R	SCC-LP	SCC-GS	SCC-PZ
Cement	467	404	400	403
LP	-	57	-	-
GS	-	-	64	-
PZ	-	-	-	58
Sand S1 (0/1)	360	360	360	360
Sand S2 (0/4)	541	541	541	541
Gravel G1 (3/8)	401	401	401	401
Gravel G2 (8/15)	401	401	401	401
Water	196	194	195	194
Superplasticizer	7.47	7.37	7.43	7.39

stopped for 2 minutes before remixing for just half a minute (30 s) and unloading. After the mixing process was completed and to ensure the self-compacting properties of concretes with admixtures of different natures, a variety of tests were carried out to determine properties of fresh SCC.

### 2.3.1 Fresh concrete tests

Before casting, the properties of SCC mixes such as filling ability, passing ability and segregation resistance, were verified according to tests recommended by the AFGC (2002) such as slump flow diameter ( $D$ ), time taken to reach a slump diameter of 500 mm ( $T_{500}$ ), V-funnel flow time ( $t_{V-Funnel}$ ),  $L$ -box height ratio ( $H_2/H_1$ ) and sieve stability ( $S\%$ ).

### 2.3.2 Manufacturing, curing and testing of specimens

After testing SCC in fresh state, a number of specimens were then cast without any vibration and compaction in lubricated molds in order to measure compressive strength ( $R_c$ ), flexural tensile strength ( $R_t$ ), ultrasonic pulse velocity (UPV), modulus of elasticity ( $E$ ) and porosity ( $P$ ). Table 4, gives the different types of mold corresponding to tests at the hardened state used in this study. In order to study the effect of water-curing temperature on SCC properties, the samples were divided into four equal groups and subjected to different curing regimes as summarized below.

For normal curing mode, specimens were kept in water at  $20\pm 3^\circ\text{C}$  until age of tests. For heat treated curing, each set of specimens was kept in heated water for 7 days and thereafter the curing was continued in water at normal temperature ( $20^\circ\text{C}$ ) until age of tests. Three different temperatures for heating water were employed in this study: 40, 60 and  $80^\circ\text{C}$ . The maximum heating temperature is limited by  $80^\circ\text{C}$  according to the temperature applying in precast concrete manufacturing (Neville 2002, Bingol and Tohumcu 2013). The heated curing duration was fixed at 7 days according to the findings of other researchers who proved that an initial water-curing of 7 days is more beneficial for compressive strength development of SCC than that for 3, 14 and 28 days (Ozer and Ozkul 2004, Zhao *et al.* 2012, Salhi *et al.* 2017).

The characterization of SCC in the hardened state was carried out by the following methods and according to the standards given in table 4. For each type of SCC, the tests were carried out on three specimens for each testing age and the average values are reported.

- For each SCC mixture, 100 mm cube specimens were used to determine the ultrasonic pulse velocity and compressive strength at 3, 7, 28, and 90 days in accordance with NF EN 12504-4



and NF EN 12390-3 respectively. The ultrasonic pulse velocity test was performed in both directions by direct transmission method so that the direction of measurement of the transit time is perpendicular to the direction of manufacture, and then the test result ultrasound for each sample is the median value of two measurements in both directions.

- Flexural tensile strength was determined using  $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$  beam samples at the ages of 3, 7, 28 and 90 days in accordance with NF EN 12390-5 standard.
- The modulus of elasticity test was conducted according to the specifications given in European standard NF EN 1352 by using  $160 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$  cylinders at the age of 28 days.
- The test of the porosity accessible to water was carried out at the age of 28 days for half prism specimens of  $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$  and the porosity was calculated according to NF P 18-459 standard.

Table 4 Description of different specimens and tests realized for SCC mixes in hardened state

Test	Age (day)	Specimen		Standard
		Form (cm)	Number	
Compressive strength	3, 7, 28 and 90	Cub ( $100 \times 100 \times 100$ )	192	NF EN 12390-3
Flexural tensile strength	3, 7, 28 and 90	Beam ( $70 \times 70 \times 280$ )	192	NF EN 12390-5
Ultrasonic pulse velocity	3, 7, 28 and 90	Cub ( $100 \times 100 \times 100$ )	192	NF EN 12504-4
Modulus of elasticity	28	Cylinder ( $\varnothing 160 \times 320$ )	16	NF EN 1352
Porosity	28	$\frac{1}{2}$ Beam ( $70 \times 70 \times 280$ )	16	NF P 18-459

### 3. Experimental results and discussion

#### 3.1 Characterization of SCC in fresh state

The test results of fresh properties SCC are illustrated in Figs. 2 and 3. As seen in Fig. 2, the slump flow diameters of all mixtures were in the range of 650 and 800 mm, which is an indication of good deformability and conforming AFGC recommendations (AFGC 2002). The effect of mineral admixture on the flow is remarkable in terms of its nature (Fig. 2). An improvement in slump flow diameter is observed by SCC-LP and SCC-GS which may be attributed to the spherical shape of LP and GS (Neville 2000). Unlike SCC-PZ which presented the lowest slump flow diameter, a decrease of 4% in comparison to the SCC-R is observed and it may be due to the angular shapes and rough surface texture of PZ (Belaidi *et al.* 2012), in addition to the pozzolanic activity of this admixture which needs a higher water amount (Juenger and Siddique 2015). These results confirm those found by other researchers (Belaidi *et al.* 2012, Boukendakdji *et al.* 2012, Derabla and Larbi 2014, Yahiaoui *et al.* 2017).

According to the  $t_{500}$  results, Fig. 2 shows that the slump flow times for all SCC mixes were less than 5 s and met the requirements of the AFGC recommendations (AFGC 2002). A decrease on  $t_{500}$  is observed by SCC-LP and SCC-GS compared to SCC-R, while the SCC-PZ had the highest value (4.5 s), which indicate the significant effect of mineral admixtures on flow time of SCC.

Based on the V-funnel test results (Fig. 2), all the SCC mixes performed well in terms of stability because all mixes exhibited a V-funnel flow time less than the recommended value (10 s)

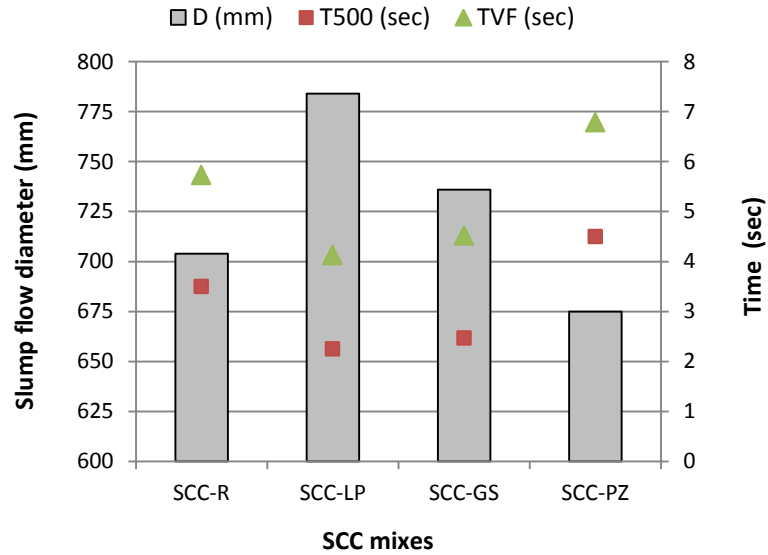


Fig. 2 Results of slump flow and V-Funnel test for SCC mixes

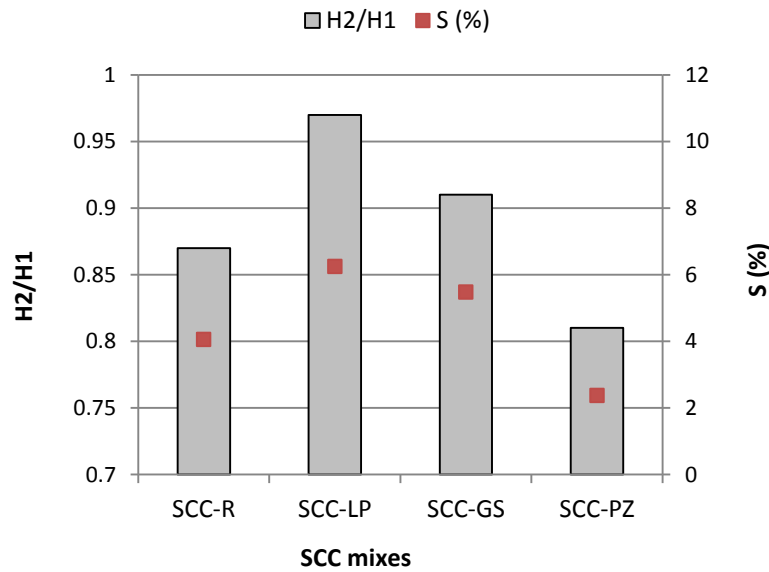


Fig. 3 Results of L-Box and sieve stability test for SCC mixes

by AFGC to obtain a good filling ability and sufficient viscosity of SCC (AFGC 2002). The lowest V-funnel flow time of 4.1 s was measured for SCC-LP, while the SCC-PZ had the highest flow time of 6.8 s. Therefore, PZ makes SCC more viscous compared to SCC made with LP or GS which confirms the results obtained by Diamantonis *et al.* (2010).

With regard to the filling capacity estimated by the  $H_2/H_1$  ratio measured through the L-box test, all self-compacting concretes had  $H_2/H_1 > 0.8$  meeting the AFGC limitations (AFGC 2002).

The highest values were observed for SCC-LP mixes and the lowest values for SCC-PZ mixes (Fig. 3). Therefore, LP and GS remarkably improved the filling and passing ability of SCC, compared to PZ.

According to AFGC recommendations (AFGC 2002), a value of segregation index less than 15% is an indicator of a good resistance to segregation. As seen in Fig. 3, all the studied SCC mixes presented values between 2% and 7% which proved a satisfactory resistance to segregation (laitance <15%). SCC-PZ is characterized by high stability (laitance of 2.3%) and consequently a high resistance to segregation and to bleeding which confirms the result obtained by other researchers (Hammat 2012, Kenai *et al.* 2014). The SCC-GS and SCC-LP mixes are homogeneous but less stable. Researchers in (Hammat 2012, Aparicio *et al.* 2016) found also that LP and GS, allow increasing the fluidity of SCC mixture but they affect negatively its stability.

It can be concluded from these tests, that all workability results were in the range established by AFGC (2002) indicating a good filling and passing ability as well as segregation resistance. Therefore, it can be said that for all mineral admixtures, the chosen composition ensures good fluidity and cohesiveness of SCC.

### 3.2 Characterization of SCC in hardened state

#### 3.2.1 Compressive strength

The results of compressive strength according to water curing temperature and age of specimens for all SCC mixes are presented in Fig. 4. The strength development depends greatly on curing temperature as it does with vibrated concrete. At early age (3 days), all mixes showed an increase in compressive strength with increasing curing temperature as initially expected. This strength gain is more important from 20 to 40°C that from 40 to 60 or 80°C. Except SCC-GS which shows a linear increase in strength, with a gain of 71%; 92%; and 124% at 40; 60 and 80°C respectively.

Beyond 7 days, the optimum curing temperature was 40°C for all SCC mixes, which led to significant increase in strength at early age without decreasing it at later age. The increase was

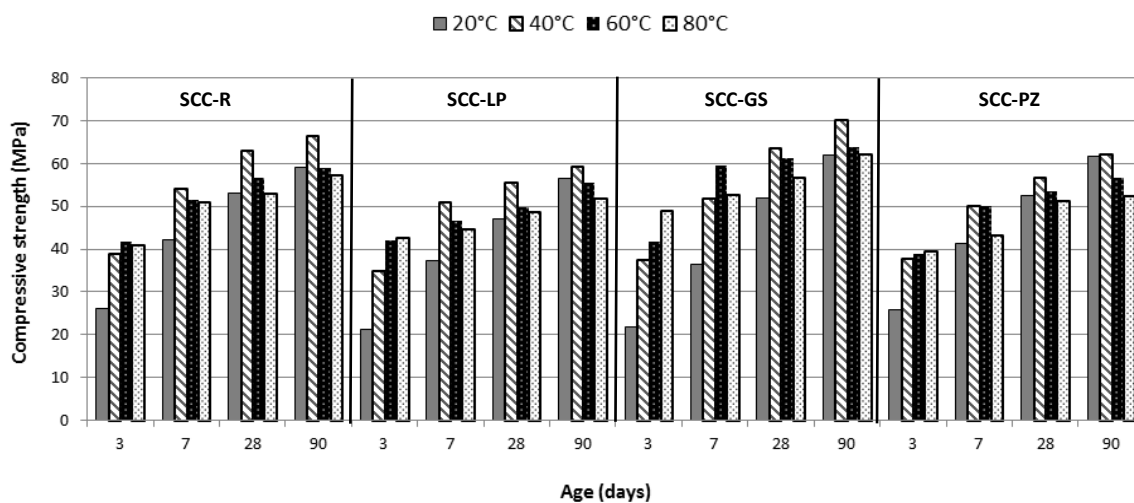


Fig. 4 Compressive strength of SCC mixes at different ages and water curing temperature

48%, 62%, 71% and 45% at 3 days and 12%, 5%, 13% and 1% at 90 days for SCC-R, SCC-LP, SCC-GS and SCC-PZ, respectively. This strength gain at later age for all mixes is due to extended hydration which is promoted under this temperature. Similar results were reported by other researchers (Bougara *et al.* 2009), who found that the curing temperature of 40°C seems to be optimum for strength development of concrete with mineral admixtures.

Increasing curing temperature to 60°C causes an improvement in strength at early age for all SCC mixes without penalizing it at later age, while comparable strengths were observed to 20°C at 90 days for SCC-R, SCC-LP and SCC-GS. Except SCC-PZ which shows a loss of 8% at 90 days.

Temperature of 80°C which has the highest energy cost, does not improve the strength of SCC-R, SCC-LP and SCC-PZ at early and later age compared to 60°C. A similar strength was observed for 60°C at 3 days (40 MPa) and a loss of 3%; 8% and 15% at 90 days as compared to 20°C at the same age. Furthermore, SCC-GS shows the highest strength at 3 days at 80°C (49 MPa) and had the same strength as that in standard curing (20°C) at 90 days with a value of 62 MPa.

By taking into account the effect of mineral admixtures, it can be seen that under standard curing conditions (20°C) and compared to SCC-R, the highest strengths are observed by SCC-PZ at all ages with an increase of about 5% at 90 days. This could be due to the higher pozzolanic activity of PZ which promotes the hydration according to Table 1 (activity index). GS with its slow hydraulic and pozzolanic reaction shows an increase in strength of SCC at early age than at later age (90 days) which confirms the results obtained by other researchers for concrete with 15% GS (Hadj-sadok *et al.* 2011, Boukendakdji *et al.* 2012). In contrary, limestone powder remains inert without any activation, with a loss in strength of SCC-LP compared to SCC-R at all ages. Ye *et al.* (2007) have also found that limestone powder used as filler in SCC does not participate in chemical reaction.

In heat treated SCC, LP is more active at early age if temperature exceeds 40°C than in standard curing with a gain in strength about 0.82 and 3.85% at 60°C and 80°C compared to SCC-R in the same temperature. From 7 days, limestone leads to a strength loss of SCC for all curing temperatures. According to Ramezaniapour *et al.* (2014), this can be explained by the fact that limestone particles act as nucleation sites and hence increase the early hydration of cement which may lead to a more disoriented crystallization of CH and strength loss at later age. For all ages, SCC with 15% GS exposed to elevated temperature exhibited significant increase in strength as compared to other SCC under the same temperature which agrees with the conclusions of other studies (Derabla and Larbi 2014, Gidion and Marios 2015). Moreover, SCC-PZ gained less strength compared to reference SCC (SCC-R) without any mineral admixture at elevated curing temperature for all ages.

### 3.2.2 Flexural tensile strength

The flexural tensile strength tests carried out on the different SCC mixes at 3, 7, 28 and 90 days are summarized in Fig. 5. In standard curing condition (20°C), and up to 28 days of age, the results indicate a negative effect of the three mineral admixtures on flexural strength of SCC with losses of 16%, 32% and 39% were observed at 3 days for SCC-LP, SCC-GS and SCC-PZ respectively compared to SCC-R. At 90 days, the highest strength was observed for SCC-GS with a value of about 9 MPa which exceeds that of SCC-R by 9%, whereas both SCC-LP and SCC-PZ show a decrease of about 3% and 4% respectively. This decrease in strength of SCC with LP was confirmed by other researchers (Parra *et al.* 2011), while the increase in flexural tensile strength for SCC with GS was also reported by Boukendakdji (2010) for SCC with 15% of granulated slag at 90 days.

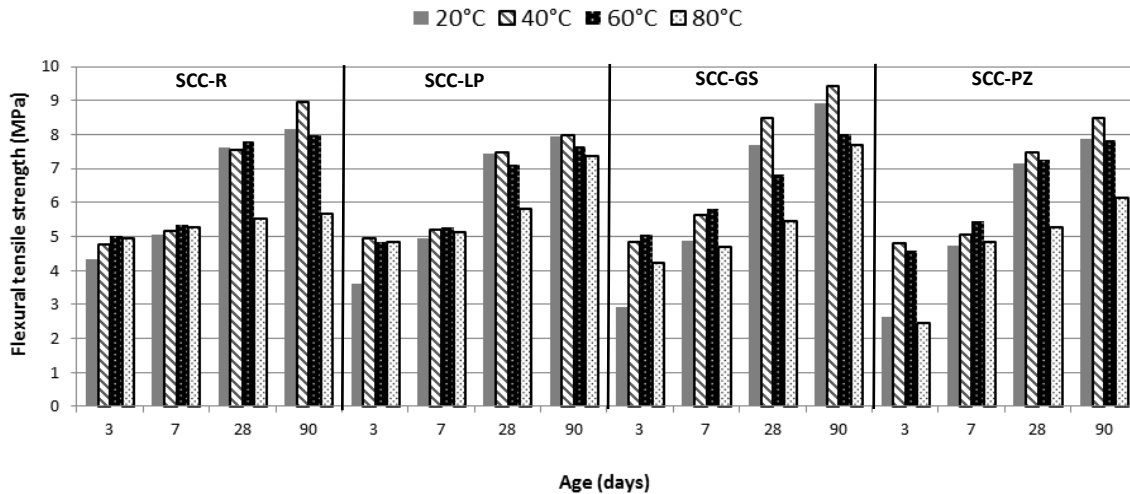


Fig. 5 Flexural tensile strength of SCC mixes at different ages and curing temperatures

At early age (up to 7 days) and like compressive strength, the flexural tensile strength of all mixes (Fig. 5) tended to increase as the curing temperature increases. Beyond this age and for temperature over 40°C a decrease was clearly observed in strength of SCC-LP and SCC-GS compared to those at 20°C, while similar strength between 20°C and 60°C, are observed for SCC-R and SCC-PZ at 28 and 90 days. Compared to other temperatures, increasing curing temperature to 80°C, does not improve the strength of all SCC mixes at all ages. This is probably due to the formation of micro-cracks above 60°C.

As compared to SCC-R an improvement of the efficiency of mineral admixtures is observed at early age as temperature increases and comparable strengths to SCC-R were observed for all SCC mixes. But at later age both SCC-LP and SCC-PZ mark a decrease in tensile strength at high temperatures, while SCC-LP marked the highest loss. However, SCC-GS presented the best behavior at 40°C and similar strength to SCC-R at 60°C in 90 days. Yazıcı *et al.* (2009) found also that the use of mineral admixtures such as FA and GS reduced the negative effect of high curing temperature on flexural strength and toughness of concrete.

From these experimental results it can be concluded that the best curing temperature to achieve the highest tensile strength of SCC was 40°C as was the case for compressive strength. Furthermore, for all curing temperatures, the highest strengths at later age were observed for SCC with GS.

### 3.2.3 Modulus of elasticity

The modulus of elasticity ( $E$ ) test was carried out at age of 28 days, the test results are presented as a function of curing temperature and mineral admixture type in Fig. 6. A significant effect of mineral admixture type on modulus of elasticity is noticed. In standard curing condition (20°C), the values of  $E$  ranged between 35 GPa and 43 GPa, where the highest value is given by SCC-GS. Whereas, the modulus of elasticity of SCC-LP and SCC-PZ fell by about 9% and 6% respectively compared to SCC-R.

Increasing curing temperature up to 40°C causes an improvement in modulus of elasticity for all mixes, where the highest modulus for all concretes was observed at this temperature which is in

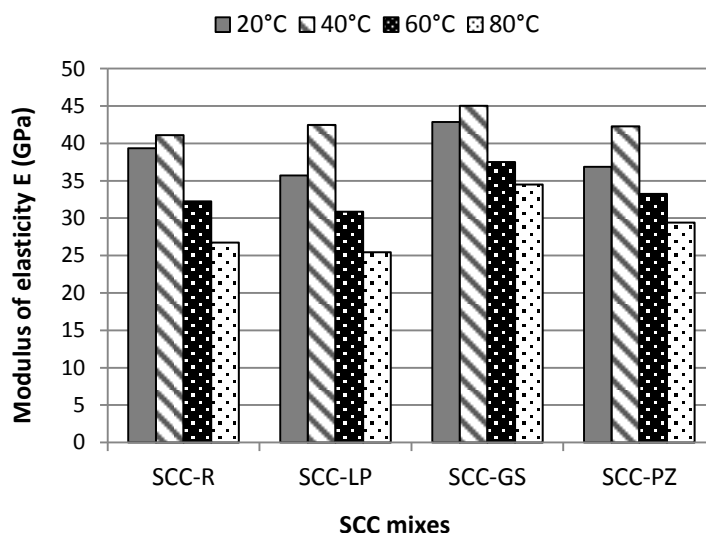


Fig. 6 Modulus of elasticity versus curing temperature and mineral admixture type

agreement with the results obtained for compressive strength. Beyond this temperature, the modulus of elasticity decreases as curing temperature of SCC mixes increases compared to those in standard curing

It is clearly observed from Fig. 6, that the incorporation of GS is very beneficial for high curing temperature allowing SCC mixes to acquire a higher modulus of elasticity at elevated curing temperature. A gain of about 9%, 10%, 16% and 29% was observed by SCC-GS at 20°C, 40°C, 60°C and 80°C respectively compared to SCC-R at the same temperatures, and the highest modulus for each curing temperature is shown by SCC-GS. In Contrary, limestone powder and natural pozzolana show no significant effect on the modulus of elasticity for curing temperature over 40°C.

#### 3.2.4 Ultrasonic pulse velocity

Ultrasonic pulse velocity (UPV) allows to evaluate not only the quality of concrete (homogeneity, presence of cracks and voids), but also to determine the compressive strength of an existing structure and in precast concrete. The test results of UPV for all SCC mixes are correlated with their corresponding compressive strengths as a function of curing temperature according to the following proposed models (Fig. 7).

$$f_c = 0.0463e^{1.5306V} ; (R^2 = 0.9645) \text{ for } 20^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$f_c = 0.1545e^{1.2461V} ; (R^2 = 0.9611) \text{ for } 40^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$f_c = 5.6001e^{0.4852V} ; (R^2 = 0.8044) \text{ for } 60^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$f_c = 3.0421e^{0.6026V} ; (R^2 = 0.8089) \text{ for } 80^\circ\text{C} \quad (4)$$

It can be noticed that even with the increase in curing temperature, a good correlation could be found between UPV and corresponding compressive strength for SCC mixes ( $R^2 > 0.8$ ). Furthermore, all the proposed correlations have exponential form relationships with different

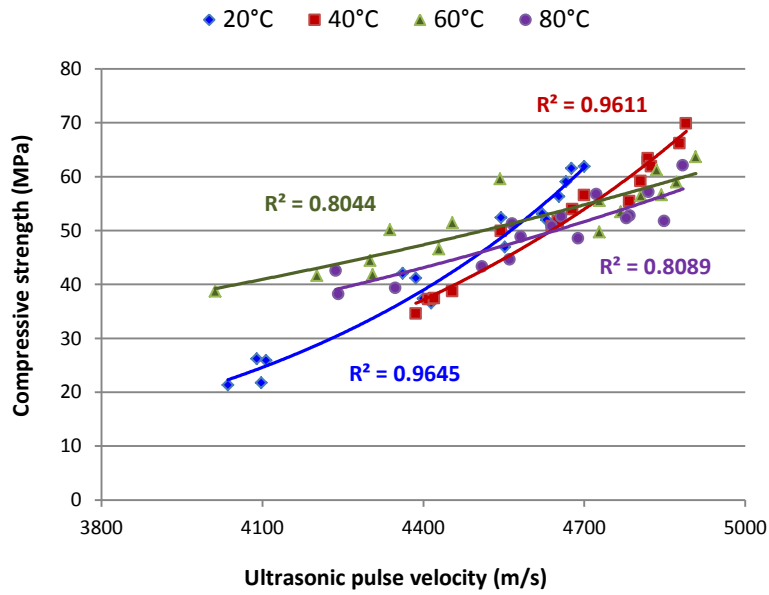


Fig. 7 Relationship between compressive strength and ultrasonic pulse velocity

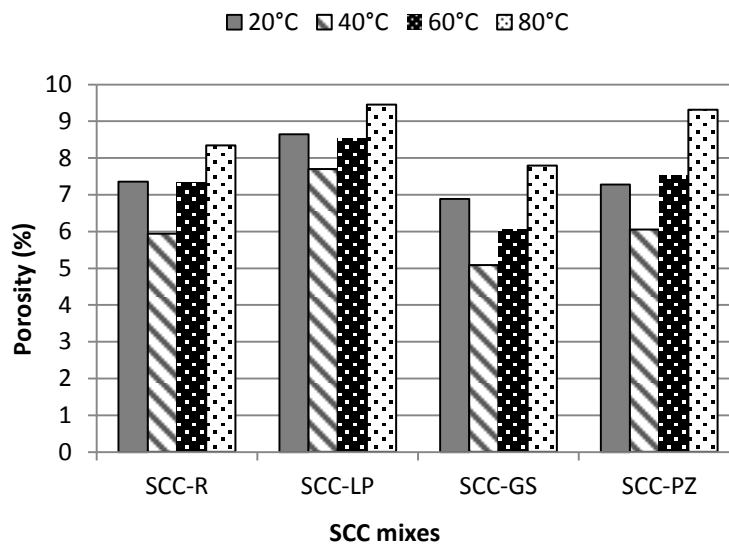


Fig. 8 Porosity of SCC mixes versus curing temperature and mineral admixture type

constant, which agree with the form obtained by other researchers for concrete with mineral admixtures (Zulphu *et al.* 2008). The correlation coefficient for SCC mixes at 20°C and 40°C is of the order of 0.96 and decreases to 0.80 at 60°C and 80°C. The relation between UPV and compressive strength is affected by curing temperature of SCC mixes and hence must be calibrated for each specific concrete.

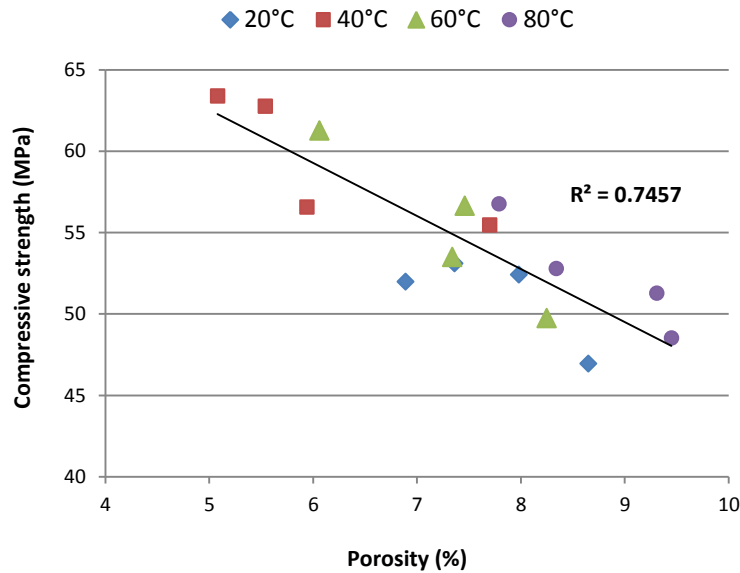


Fig. 9 Relationship between compressive strength and porosity of SCC mixes

### 3.2.5 Porosity

Concrete durability depends greatly on its porosity, which determines the intensity of interaction of concrete with aggressive agents. The porosity test results obtained for 28 days age SCC mixes, at different curing temperatures are shown in Fig. 8.

In standard curing conditions, the results indicate the important effect of mineral admixtures on porosity of SCC. Indeed, GS and PZ by their hydraulic or pozzolanic activity, lead to the lowest porosities, with reductions of 6% and 1%, confirming the results of compressive strength at the age of 28 days. Furthermore, a greater increase (17.5%) was noted in the porosity of SCC-LP compared to SCC-R. Derabla and Larbi (2014), reported higher reduction of porosity (40%) when incorporating about 20% of GS. Boucetta (2014) also reported a decrease in the porosity of SCC with slag compared to those with LP.

Increasing curing temperature to 40°C decreases SCC porosity for all mixes, while a loss of 25%, 11%, 26% and 17% is observed for SCC-R, SCC-LP, SCC-GS and SCC-PZ, respectively compared to those found at 20°C. Furthermore, the same porosities are shown for all SCC mixes between 20°C and 60°C, except SCC-GS which shows a reduction of 12% at this temperature. A good performance and better durability for heat treated SCC can be obtained under temperature up to 60°C by adding GS. Beyond this temperature, the porosity becomes higher with the increase of curing temperature, so that the higher values are measured at 80°C for all SCC mixes.

The most porous SCC for all curing temperature is SCC-LP mix, which presents porosities exceeding those of SCC-R by about 18%, 30%, 16% and 13% at 20°C, 40°C, 60°C and 80°C, respectively. Similar results were observed by Derabla and Larbi (2014) for SCC with 20% LP. Furthermore an increase in porosity compared to SCC-R, is also observed by SCC-PZ for temperature beyond 40°C. The SCC mixes with GS are the less porous for all temperatures; while, a reduction of 6%, 15%, 17% and 7% is observed compared to SCC-R at 20°C, 40°C, 60°C and 80°C, respectively and confirming the results of compressive strength.



Porosity may be directly related to the compressive strength; indeed, Fig. 9 shows the relationships between 28 days compressive strength and porosity of SCC mixes depending on curing temperatures. It can be clearly seen that compressive strength is highly dependent on porosity of concrete caused by increasing curing temperature.

## 5. Conclusions

The main aim of this study is to investigate the effect of curing temperature and mineral admixtures, i.e., LP, GS, and PZ, on mechanical properties and porosity of SCC. Based on the experimental results, the following conclusions can be drawn:

- It is possible to have self-compacting concrete properties when the cement is substituted by 15% of local mineral admixtures. Furthermore, an improvement in fluidity and deformability measurements was observed by LP and GS, unlike PZ which has developed a less workable SCC but with high segregation resistance.
- In standard curing conditions, SCC-PZ presents the highest performances for all ages. Furthermore, GS with its slow hydraulic activity presents its efficiency at later age (90 days). Conversely, LP remains inert without any activation. Hence its use can be justified only by particular economic and ecological considerations.
- Increasing curing temperature leads to considerable improvement in hydration and strength of SCC mixes. While, the optimum curing temperature to obtain a high performances SCC at early and later age, is 40°C for SCC-PZ, 60°C for SCC-R and SCC-LP and 80°C for SCC-GS (49 and 62 MPa at 3 days and 90 days respectively). Granulated slag is considered the most effective mineral admixture, where its use produces the more resistant and less porous heat treated SCC mixes.
- Based on the results found for mechanical strengths, elastic deformation and porosity; all SCC mixes are considered satisfactory for application in structural elements and the effects of high curing temperature are not harmful to SCC properties as is the case for vibrated concrete.

## References

- AFGC, (2002), *Interim Recommendations for Use of Self-consolidating Concrete*, French Association of Civil Engineering, France.
- Aparicio, S., Martínez-Ramírez, S., Ranz, J., Fuente, J.V. and Hernández, M.G. (2016), "Microstructural and mechanical properties study of the curing process of self-compacting concrete", *Mater. Des.*, **94**, 479-486.
- Ba, M., Qian, Ch., Guo, X. and Han, X. (2011), "Effects of steam curing on strength and porous structure of concrete with low water/binder ratio", *Constr. Build. Mater.*, **25**, 123-128.
- Belaidi, A.S.E., Azzouz, L., Kadri, E.H. and Kenai, S. (2012), "Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete", *Constr. Build. Mater.*, **31**, 251-257.
- Bingol, A.F. and Tohumcu, I. (2013), "Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self-compacting concrete incorporating fly ash and silica fume", *Mater. Des.*, **51**, 12-18.
- Boubekeur, T., Ezziane, K. and Kadri, E.H. (2017), "Quantification and analysis of heat hydration of blended cement at different temperature", *J. Adhes. Sci. Technol.*, 1568-5616
- Boucetta, T.A. (2014), "Contribution of granulated slag and glass powder to the flow and durability properties of self-compacting concrete and high-performance concrete", Ph.D. Thesis, University of Annaba, Algeria.

- Bougara, A., Lynsdale, C. and Ezziane, K. (2009), "Activation of Algerian slag in mortars", *Constr. Build. Mater.*, **23**, 542-547.
- Boukendakdji, O. (2010), "Study of the influence of the formulation parameters on properties of self-compacting concrete: optimization of operating conditions", Ph.D. Thesis, University of Blida1, Algeria.
- Boukendakdji, O., Kadri, E.H. and Kenai, S. (2012), "Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete", *Cement Concrete Compos.*, **34**, 583-590.
- Chopin, D., De-Larrard, F. and Cazacliu, B. (2004), "Why do HPC and SCC require a longer mixing time?", *Cement Concrete Res.*, **34**, 2237-2243.
- Chore, H.S. and Joshia, M.P. (2015), "Strength evaluation of concrete with fly ash and GGBFS as cement replacing materials", *Adv. Concrete Constr.*, **3**(3), 223-236.
- Deepankar, K.A., Bhupinder, S. and Surrender, K.V. (2016), "The effect of attack of chloride and sulphate on ground granulated blast furnace slag concrete", *Adv. Concrete Constr.*, **4**(2), 107-121.
- Derabla, R. and Larbi Benmalek, M. (2014), "Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term", *Constr. Build. Mater.*, **66**, 787-794.
- Diamantonis, N., Marinos, I., Katsiotis, M.S., Sakellariou, A., Papathanasiou, A., Kaloidas, V. and Katsioti, M. (2010), "Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete", *Constr. Build. Mater.*, **24**, 1518-1522.
- Escalante-Garcia, J.I. and Sharp, J.H. (2001), "The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures", *Cement Concrete Res.*, **31**, 695-702.
- Ghrici, M., Kenai, S. and Said-Mansour, M. (2007), "Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements", *Cement Concrete Compos.*, **29**, 542-549.
- Gidion, T. and Marios, N.S. (2015), "Supplementary cementitious materials: Strength development of self-compacting concrete under different curing temperature", *The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), Procedia Engineering*, **125**, 699 - 704.
- Hadj-sadok, A., Kenai, S., Courard, L. and Darimont, A. (2011), "Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag", *Constr. Build. Mater.*, **25**, 1018-1025.
- Hallal, A., Kadri, E.H., Ezziane, K., Kadri, A. and Khelafi, H. (2010), "Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste", *Constr. Build. Mater.*, **24**, 1418-1423.
- Hammam, S. (2012), "Influence of slag and pozzolana on the shrinkage of self-compacting mortars", Master Thesis, University, of Blida1, Blida, Algeria.
- Ho, D.W.S., Chua, C.W. and Tam, C.T. (2003), "Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures", *Cement Concrete Res.*, **33**, 595-601.
- Itim, A., Ezziane, K. and Kadri, E.H. (2011), "Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions", *Constr. Build. Mater.*, **25**, 3603-3609.
- Juenger, M.C.G. and Siddique, R. (2015), "Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete", *Cement Concrete Res.*, **78**, 71-80.
- Kangkang, T., Steve, M. and Greg, B. (2015), "Technical and economical feasibility of using GGBS in long span concrete structures", *Adv. Concrete Constr.*, **3**(1), 1-14.
- Kanstad, T., Hammer, T.A., Bjontegaard, O. and Sellevold, E.J. (2003), "Mechanical properties of young concrete: Part I: Experimental results related to test methods and temperature effects", *Mater. Struct.*, **36**, 218-225.
- Kenai, S., Debbih, A., Menadi, B. and Kadri, E.H. (2014), "Effect of coarse and fine recycled aggregates and natural pozzolana on fresh properties of self-compacting concrete", *Proceedings of the 2014 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Material Research (ACEM14)*, Busan, Korea, Augus.
- Kim, J.K., Moon, Y.H. and Eo, S.H. (2000), "Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature", *Cement Concrete Res.*, **28**, 1761-1773.
- Lenkaa, S. and Panda, K.C. (2017), "Effect of metakaolin on the properties of conventional and self-compacting concrete", *Adv. Concrete Constr.*, **5**(1), 31-48.

- Liu, B., Xie, Y. and Li, J. (2005), "Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials", *Cement Concrete Res.*, **35**, 994-1002.
- Lothenbach, B., Winnefeld, F., Alder, C., Wieland, E. and Lunk, P. (2007), "Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes", *Cement Concrete Res.*, **37**, 483-491.
- Mallikarjuna, R.G. and Gunneswara, R.T.D. (2017), "Effect of fly ash and GGBS combination on mechanical and durability properties of GPC", *Adv. Concrete Constr.*, **5**(4), 313-330.
- Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J. and Ait-Mokhtar, A. (2009), "Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand", *Constr. Build. Mater.*, **23**, 625-633.
- Neville, A-M. (2000), *Properties of Concrete*, Eyrolles Editions, Paris, France.
- Okamura, H. and Ouchi, M. (2003), "Self-compacting concrete", *J. Adv. Concrete Technol.*, **1**, 5-15.
- Ozer, B. and Ozkul, M.H. (2004), "The influence of initial water curing on the strength development of ordinary portland and pozzolanic cement concretes", *Cement Concrete Res.*, **1**, 1-6.
- Parra, C., Valcuende, M. and Gómez, F. (2011), "Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete", *Constr. Build. Mater.*, **25**, 201-207.
- Persson, B. (2001), "Comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete", *Cement Concrete Res.*, **31**, 193-198.
- Pihlajavaara, S. (1972), "Effect of temperature on strength of concrete", *Am. Concrete Inst. Spec. Publ.*, **34**, 347-434.
- Rakesh, K.P. and Bibhuti, B.M. (2016), "Fresh and hardened properties of concrete incorporating ground granulated blast furnace slag-A review", *Adv. Concrete Constr.*, **4**(4), 283-303.
- Ramezaniapour, A.A., Khazali, M.H. and Vosoughi, P. (2013), "Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete", *Constr. Build. Mater.*, **49**, 807-813.
- Ramezaniapour, A.M., Esmaeili, K., Ghahari, S.A. and Ramezaniapour, A.A. (2014), "Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete", *Constr. Build. Mater.*, **73**, 187-194.
- Reinhardt, H.W. and Stegmaier, M. (2006), "Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC)", *Cement Concrete Res.*, **36**, 879-885.
- Salhi, M., Ghrici M., Li, A. and Bilir, T. (2017), "Effect of curing treatments on the material properties of hardened self-compacting concrete", *Adv. Concrete Constr.*, **5**(4), 359-375.
- Siad, H., Kamali-Bernard, S., Mesbah, H.A., Escadeillas, G., Mouli, M. and Khelafi, H. (2013), "Characterization of the degradation of self-compacting concretes in sodium sulfate environment: Influence of different mineral admixtures", *Constr. Build. Mater.*, **47**, 1188-1200.
- Yahiaoui, W., Kenai, S., Menadi B., Kadri, E.H. (2017), "Durability of self-compacted concrete containing slag in hot climate", *Adv. Concrete Constr.*, **5**(3), 271-288.
- Yazici, H., Yardimci, M.Y., Aydin, S. and Karabulut, A.S. (2009), "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes", *Constr. Build. Mater.*, **23**, 1223-1231.
- Ye, G., Liu, X., De-Schutter, G., Poppe, A.M. and Taerwe, L. (2007), "Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes", *Cement Concrete Compos.*, **29**, 94-102.
- Zhao, H., Sun, W., Wu, X. and Gao, B. (2012), "Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concrete", *Mater. Des.*, **35**, 194-200.
- Zulphu, C.U., Kazim, T. and Mehmet, K. (2008), "Effect of mineral admixtures on the correlation between ultrasonic velocity and compressive strength for self-compacting concrete", *Russ. J. Nondestructive Test.*, **44**, 367-374.