

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA****Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

Département de Génie Civil

**MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Construction

**EFFETS DU CLIMAT CHAUD SUR LES PERFORMANCES DES BETONS  
AUTOPLAÇANTS A BASE DE LAITIER**

Par

**Walid YAHIAOUI**

Devant le jury composé de :

GRINE Khaled	Maitre de conférence.A	U. S.D.B	Président
DEBIEB Farid	Maitre de conférence.A	U. MEDEA	Examineur
BOUIKNI Ammar	Maitre de conférence.A	U. S.D.B	Examineur
KENAI Said	Professeur	U. S.D.B	Rapporteur
MENADI Belkacem	Maitre de conférence.A	U. S.D.B	Co-Rapporteur

Blida, Novembre 2013

## Abstract

Self-compacting concrete (SCC) is a fluid concrete, highly deformable, homogeneous and stable which takes place by gravity and without vibration. The performance of SCC in moderate climate is well investigated. However, few studies are available on the effect of hot and dry environment. Algeria is characterized by a hot climate environment and there is a need to investigate the effect of local environment on the performance of SCC. In this dissertation, the effect of hot climate on the performance of SCC is studied. Cement was substituted by slag by weight at two different levels of substitution (15% and 25%). Concrete specimens were stored either in a standard environment ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH} = 100\%$ ) or in the open air in the region of Blida during the summer period after an initial humid curing period of 1, 3, 7, 14 or 28 days. Compressive strength at 28 and 90 days, water permeability by capillary, water permeability and porosity were investigated. The experimental results show the importance of humid curing in hot climates in particular when granulated blast furnace slag is used. The substitution of cement by slag improves SCC durability at long term.

**Keywords:** Self-compacting concrete, slag, hot climate, compressive strength, permeability, durability

## Résumé

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par le seul effet de la gravité et sans vibration. La performance du BAP dans un climat modéré est bien étudiée. Cependant, peu d'études sont disponibles sur les effets de l'environnement chaud et sec. L'Algérie est connue par son environnement de climat chaud et il est nécessaire d'étudier l'effet de l'environnement local sur la performance de BAP. Dans ce mémoire, l'effet du climat chaud sur les performances de BAP est étudié. Le ciment a été substitué par du laitier en poids à deux niveaux de substitution (15% et 25%). Les éprouvettes de béton ont été conservées soit dans un environnement standard (T= 20°C, HR= 100%) ou en plein air dans la région de Blida durant la période d'été après une période de cure humide initiale de 1, 3, 7, 14 ou 28 jour. La résistance à la compression à 28 et 90 jours, l'absorption capillaire, la perméabilité à l'eau et la porosité ont été étudiés. Les résultats expérimentaux montrent l'importance de la cure humide dans les climats chauds, en particulier lorsque le laitier de haut fourneau est utilisé. La substitution du ciment par du laitier améliore la durabilité des BAP à long terme.

**Mot clés :** Béton autoplaçant, laitier, climat chaud, résistance à la compression, perméabilité, durabilité.

## الملخص

تعرف الخرسانة المرصوصة ذاتيا بأنها خرسانة ذات قابلية تشغيل عالية و تأخذ مكانها بفعل وزنها الذاتي، يجب أن تكون الخرسانة المرصوصة ذاتيا متجانسة و مستقرة. أداء الخرسانة بدون رج داخلي أو خارجي. في مناخ معتدل مدروسة سابقا بشكل جيد. ولكن عدد قليل من الدراسات متوفرة في البيئة الحارة والجافة. الجزائر معروفة بمناخها الحار ومن الضروري دراسة تأثير البيئة المحلية على أداء الخرسانة المرصوصة ذاتيا حيث المرصوصة ذاتيا. تم في هذا البحث دراسة تأثير الطقس الحار على أداء تم استبدال نسبة من وزن الاسمنت بخبث الفرن العالي بنسبتين تقدر ب (15% و 25%). ومن ثم تم أو في الهواء الطلق في منطقة البليدة (%RH = 100، T = 20 تخزين عينات الخرسانة في بيئة قياسية ) خلال فترة الصيف، بعد فترة من المعالجة بوضعها بالماء لعدد من الايام : 1، 3، 7، 14 أو 28 يوما. من ثم تم قياس قوة الضغط على العينات السابقة بعد 28 و 90 يوما، تم دراسة نفاذية المياه عن على العينات بطريقة امتصاص الشعيرات ونفاذية المياه مع وجود ضغط للماء. وقد أظهرت النتائج التجريبية على أهمية المعالجة الرطبة في المناخ الحار، وخصوصا عندما يتم استخدام خبث الفرن العالي. تتحسن استدامة الخرسانة على المدى الطويل باستبدال الأسمنت بنسبة من الخبث

**كلمات مفاتيح :** الخرسانة المرصوصة ذاتيا، الخبث، المناخ الحار، قوة الضغط، النفاذية، المتانة

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent, en premier lieu, à mes deux responsables de mémoire, Monsieur Belkacem MENADI, Maître de conférences à l'université de Blida et à Monsieur Said KENAI, Professeur à l'université de Blida, pour leur précieuse aide qui a permis de réaliser ce travail. Je les remercie pour leur disponibilité, leurs conseils et orientations ainsi pour leurs grandes qualités humaines. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance. Espérant avoir l'occasion de travailler avec eux dans des futurs travaux.

Je souhaiterais également remercier, Monsieur HOUARI, Chef de département de chimie industrielle de nous avoir ouvert les portes du laboratoire des matériaux de son département.

J'adresse aussi mes remerciements à toute l'équipe de GRANITEX et de LAFARGE qui ont mis à ma disposition des produits nécessaires pour l'élaboration de mon travail de recherche.

Je tiens à remercier aussi tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail :

- Monsieur K.GRINE, Maître de conférences, Université Saad Dahleb-Blida.
- Monsieur F.DEBIEB, Maître de conférences, Université de Médéa.
- Monsieur A.BOUIKNI, Maître de conférences, Université Saad Dahleb-Blida.

Je remercie enfin tous les membres de ma famille, particulièrement mes parents et ma fiancée qui m'ont aidé et soutenu tout au long de ce travail.

## TABLE DES MATIERES

RESUME.....	1
REMERCEMENT.....	4
TABLE DE MATIERE.....	5
LISTE DES FIGURES.....	9
LISTE DES TABLEAUX.....	14
LISTE DES ABREVIATIONS.....	16
<b>INTRODUCION GENERALE.....</b>	<b>20</b>
<b>CHAPITREI :REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
1.1 Généralité.....	22
1.2. Climat chaud.....	22
1.2.1. Définition.....	22
1.2.2. Facteurs climatiques agissants sur le béton par temps chaud.....	22
a. Température.....	22
b. Humidité relative.....	23
c. Rayonnement solaire.....	23
d. Evaporation : la conjonction des paramètres précédents.....	24
1.3. Influence du climat chaud sur les performances du béton.....	25
1.3.1. Ouvrabilité.....	26
1.3.2. Temps de prise.....	29
1.3.3. Retrait.....	30
1.4. Propriétés mécanique du béton durci.....	31
1.4.1. Résistance à la compression.....	31
1.4.2. Effet de laitier sur la résistance à la compression.....	37
1.5. Durabilité des bétons.....	38
1.5.1 Facteurs affectant la durabilité du béton.....	39
a. La perméabilité du béton.....	39
b. Diffusion.....	40
c. Absorption.....	40
1.5.2. Effet du climat chaud sur la durabilité des bétons.....	41

a. Diffusion des ions du chlore et porosité.....	41
b. Absorption capillaire.....	46
c. Perméabilité l'eau.....	47
d. Effet du laitier sur la durabilité.....	49
1.6 Influence du climat chaud sur les performances du béton autoplaçant.....	51
1.6.1 Définition et avantages.....	51
1.6.2 Formulation des BAP.....	53
1.6.3 Propriétés des bétons autoplaçant à l'état frais.....	53
1.6.3.1 Essai d'étalement (Slump Flow).....	54
1.6.3.2 Essai de la boîte en L.....	54
1.6.3.3 Essai de V funnel.....	55
1.6.3.4 Essai de stabilité au tamis.....	55
1.6.4 Influence du climat chaud sur les performances des BAP.....	56
1.6.4.1 Etat frais.....	56
1.6.4.2 Etat durci.....	57
a. Résistance à la compression.....	57
b. Carbonatation.....	61
c. Diffusion des ions du chlorure.....	62
d. Absorption capillaire.....	62
1.4 Conclusion.....	65
<b>CHAPITRE II: MATERIAUX ET ESSAIS</b>	
2.1 Introduction.....	66
2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés.....	66
2.2.1 Le Ciment.....	66
2.2.2 Le laitier.....	66
2.2.3 Le sable.....	69
2.2.4 Le gravier.....	70
2.2.5 Eau de gâchage.....	70
2.2.6 Les superplastifiants.....	71
2.3 Formulations adoptées.....	71
2.3.1. Formulation du Mortier autoplaçant.....	72
2.3.2 Essais réalisés sur mortier.....	72

a. Essai d'Étalement au Mini-Cône.....	72
b. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test).....	72
2.3.3. Essais réalisés sur béton.....	73
2.3.3.1 Essai à l'état frais.....	75
a. Essai d'étalement (Slump flow test).....	75
b. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test).....	76
c. Essai de la boîte en L.....	76
d. Essai de résistance à la ségrégation par tamisage.....	77
2.3.3.2 Essai à l'état durci.....	78
a. Résistance à la compression.....	78
b. Absorption capillaire.....	79
c. Perméabilité à l'eau.....	81
d. la porosité accessible à l'eau.....	82
2.4. Mode de cure.....	84
2.5. Récapitulatif des essais réalisés.....	85
<b>CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS</b>	
3.1 Introduction.....	87
3.2 Optimisation de dosage du superplastifiant.....	87
3.2.1 Essai de mini cône.....	88
3.2.2 Essai de V-funnel.....	88
3.3 Effet du laitier sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais.....	90
3.3.1 Étalement et Temps T50 au cône d'Abrams.....	91
3.3.2 Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel .....	93
3.3.3 Mesure du rapport H2/H1, les temps d'écoulement T20, T40 de l'essai de la boîte en L.....	94
3.3.4 Résistance à la ségrégation par tamisage.....	97
3.4 Effet du climat chaud sur l'état durci des BAP à base du laitier.....	99
3.4.1 La résistance mécanique.....	99
3.4.2 L'absorption capillaire.....	103
3.4.3. La perméabilité à l'eau.....	109
3.4.4 La porosité ouverte accessible à l'eau.....	112
3.5 Conclusion.....	115
Conclusion générale.....	116



<b>Références</b> .....	118
<b>ANNEXE A</b> .....	128
<b>ANNEXE B</b> .....	131

## Liste des figures

Figure 1.1 : Abaque permettant de calculer la vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité relative, vitesse du vent et température du béton).....	25
Figure 1.2 : Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants.....	26
Figure.1.3 : Effet de la température du béton sur l'affaissement (slump) et sur la quantité d'eau nécessaire lorsque l'affaissement varie de 25 mm.....	27
Figure 1.4 : Effet de la température du béton sur la quantité d'eau requise pour maintenir un affaissement de 75 mm.....	27
Figure 1.5 : Evolution de la perte de l'affaissement dans le temps en fonction de la température du béton frais et de la valeur de l'affaissement initial.....	28
Figure 1.6 : Effet de la température sur la perte d'affaissement des bétons plastique coulé à une température de 22°C et 32°C.....	28
Figure1.7 : Evolution de l'affaissement au cône en fonction de la température.....	29
Figure 1.8 :I de la température sur le début et la fin de prise d'un CPA (CEM I 32.5).	29
Figure 1.9 : Effet de la température sur le temps de début de prise.....	30
Figure 1.10 : Effet de la température sur le temps de fin de prise.....	30
Figure 1.11 : Développement de la résistance à la compression du béton dans la cure humide.....	32
Figure 1.12 : Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après démoulage.....	32
Figure 1.13 : Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après deux jours de cure humide.....	32
Figure 1.14 : Développement de la résistance à la compression du béton conservé à une température de 38°C et 65% d'humidité.....	33
Figure 1.15 : Effet de la température sur la résistance à la compression et à la traction à jours.....	33
.....	28
.....	

Figure1. 16 : Effet du degré de saturation sur la résistance à la compression et à la traction à 28 jours.....	34
Figure 1.17 : Influence des méthodes de cure sur la résistance $f_c$ , des éprouvettes conservées à l'air libre.....	34
Figure 1.18 : Influence des méthodes de cure sur la résistance $f_t$ , des éprouvettes conservées à l'air libre.....	35
Figure 1. 19 : Effet de la période de cure sur la résistance à la compression du béton, (---) cure à l'eau à l'intérieur du laboratoire, ( ) cure en dehors de la toile de jute.....	36
Figure 1.20 : Distribution de la taille des pores du mortier durci dans une cure humide après démoulage.....	42
Figure1. 21 : Distribution de la taille des pores du mortier durci dans une chambre climatique après démoulage.....	42
Figure1.22 : Distribution de la taille des pores du mortier durci dans une chambre climatique après deux jours de cure humide.....	43
Figure1. 23 : Distribution de la taille des pores du mortier durci à 38°C et 65% HR... 43	43
Figure 1. 24 : Influence de la température d'exposition sur la pénétration des chlorures dans le béton.....	44
Figure1.25 : Coefficient de diffusion en fonction de la température (cure humide).....	45
Figure1.26 : Coefficient de diffusion en fonction de la température (l'air libre).....	45
Figure1. 27 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité en fonction de l'âge.....	47
Figure1. 28 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité en fonction de l'âge.....	48
Figure1. 29 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité en fonction de l'âge.....	48
Figure1.30 : Coefficient de perméabilité de tous les types de béton testés en fonction de la température, pendant 1heure et 48hheures.....	48
Figure 1.31 : La distribution de la taille des pores dans le béton (âgé 12 mois, E/C = 0,43).....	49
Figure 1.32: Influence des cendres volantes et du laitier sur l'évolution de la structure poreuse des pâtes de ciment au cours du temps.....	50
Figure1.33 : Essai d'étalement au cône (slump Flow).....	54
Figure 1.34 : Essai de la boîte en L.....	55
Figure 1.35 : Schématisation de l'Essai de l'entonnoir (V funnel).....	55

Figure 1. 36: Schématisation de l'essai de stabilité au tamis.....	56
Figure 1.37 : Influence des températures chaudes et froides sur étalement des BAP.....	57
Figure 1.38 : Résistance à la compression de type I: (a) le dosage en ciment = 550 kg/m <sup>3</sup> ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m <sup>3</sup> .....	58
Figure 1.39 : Résistance à la compression de type II: (a) le dosage en ciment = 550 kg/m <sup>3</sup> ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m <sup>3</sup> .....	58
Figure 1.40 : Effet de condition de cure sur la résistance à la compression pour le type I : (a) le dosage en ciment = 550 kg/m <sup>3</sup> ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m <sup>3</sup> ...	58
Figure 1.41 : Effet de condition de cure sur la résistance à la compression pour le type II : (a) le dosage en ciment = 550 kg/m <sup>3</sup> ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m <sup>3</sup> ...	59
Figure 1. 42: Résistance à la compression des éprouvettes de béton selon le pourcentage d'EPA et les conditions de cure.....	59
Figure 1.43 : Développement de la résistance à la compression des BAP dont la cure initiale dans l'eau et dans des différentes conditions de cure.....	60
Figure 1.44 : Résistance à la compression du béton ordinaire et BAP pour les différentes méthodes de cure (a) eau, (b) sealed et (c) air.....	60
Figure 1.45 : La profondeur de carbonatation dans des différentes initiale et conditions de cure.....	61
Figure 1.46 : La relation entre la résistance à la compression de 28 jours et de 28 jours profondeur de carbonatation des BAP dans des différentes initiale et conditions de cure.....	61
Figure 1.47 : Diffusion des ions du chlorure des BAP dans une cure initiale et dans des différentes conditions de cure.....	62
Figure 1.48 : Les valeurs de sorptivité des bétons dans des différentes conditions de cure.....	64
Figure 1.49 : Effets de pourcentage d'EPA sur la porosité apparente des éprouvettes dans des conditions différentes pour 28 jours de cure.....	64
Figure 2.1: Laitier granulé de haut fourneau utilisée : (1) avant broyage, (2) après broyage.....	66
Figure 2.2: Broyeur à boulet utilisé.....	67
Figure 2.3 : Courbe granulométrique du sable et gravier naturels.....	70
Figure 2.4: Séquence de malaxage du mortier.....	72

Figure 2. 5: Essai d'Étalement pour Mortier.....	72
Figure 2.6 : Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier.....	73
Figure 2.7 : Séquence de malaxage du béton.....	74
Figure 2.8: Essai d'étalement.....	75
Figure 2. 9: Essai V-funnel.....	76
Figure 2.10 : Essai de la boîte en L.....	77
Figure 2.11 : Essai de stabilité au tamis.....	78
Figure 2.12 : Dispositif de l'essai de compression simple.....	79
Figure 2.13 : Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité...	80
Figure 2. 14 : Essai de perméabilité à l'eau.....	81
Figure 2.15 : Essai brésilien.....	82
Figure 2.16: Mesure de la profondeur de pénétration d'eau.....	82
Figure 2.17 : Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes.....	83
Figure 2.18 : Saturation des éprouvettes dans l'eau.....	84
Figure 2.19: Les éprouvettes conservées dans l'eau douce.....	84
Figure 2.20 : Les éprouvettes conservées à l'air libre.....	85
Figure 2.21 : organigramme des différents essais réalisés sur le béton.....	86
Figure3.1: Valeurs d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant.....	88
Figure 3.2 : Temps d'écoulement en fonction de dosage de superplastifiant.....	89
Figure 3.3 : Etalement et le temps d'écoulement T50 en fonction de la teneur en laitier.....	92
Figure 3.4 : TV-Funnel en fonction de la teneur en laitier.....	94
Figure 3.5 : Rapport H2/H1 en fonction de la teneur en laitier.....	95
Figure3.6 : Temps d'écoulement T20 et T40 en fonction de la teneur en laitier.....	97
Figure 3.7 : Résistance à la ségrégation par tamisage en fonction de la teneur en laitier.....	98
Figure 3.8 : Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 28jours des BAP à base de laitier .....	101
Figure 3.9 : Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 90jours des BAP à base de laitier.....	102

Figure 3.10 : Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 28 et 90 jours des BAP à base de laitier .....	102
Figure3.11 : Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des BAP à base de 0% de laitier.....	105
Figure3.12 : Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 0% de laitier.....	105
Figure3.13 : Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des BAP à base de 15% de laitier.....	106
Figure3.14 : Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 15% de laitier.....	106
Figure3.16 : Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des petits pores des BAP à base de 25% de laitier.....	107
Figure3.15 : Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 25% de laitier.....	107
Figure3.17 : Effet de la durée de cure sur la sorptivité des grands pores des BAP en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure.....	108
Figure3.18 : Effet de la durée de cure sur la sorptivité des petits pores des BAP à base de laitier.....	108
Figure3.19 : Effet de la durée de cure sur la profondeur de pénétration d'eau des BAP à base de laitier.....	111
Figure3.20 : Corrélation entre la résistance à la compression et la perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure.....	112
Figure3.21 : Effet de la durée de cure sur la porosité accessible à l'eau des BAP à base de laitier.....	114
Figure3.22 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité accessible à l'eau.....	114

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Influence de la température sur le coefficient de diffusion effectif des chlorures.....	46
Tableau 1.2: Strength and physical characteristics of SLWC.....	48
Tableau 1.3 : La composition chimique principale moyenne d'un laitier.....	49
Tableau 1.4: Coefficient de capillarité des échantillons de béton selon les différents pourcentages d'EPA et les conditions de cure.....	63
Tableau 2.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	66
Tableau 2.2 : Composition chimique du laitier d'El Hadjar.....	67
Tableau 2.3 : Indice d'Activité hydraulique du laitier granulé.....	69
Tableau 2.4: Caractéristiques physiques et mécaniques du sable corrigé.....	69
Tableau 2.5 : Caractéristiques physique de gravier.....	70
Tableau 2.6: Classes d'étalement.....	76
Tableau 3.1 : Compositions des mortiers obtenues en fonction du rapport optimale SP/L.....	87
Tableau 3.2 : Valeurs d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant.....	88
Tableau 3.3: Valeur de temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant.....	89
Tableau 3.4 : Composition des BAP testés.....	90
Tableau 3.5 : Valeurs recommandés pour les essais du BAP.....	90
Tableau 3.6 : Valeurs de l'étalement et le temps d'étalement T50 au cône d'Abrams.....	91
Tableau 3.7 : Valeurs de temps d'écoulement au V-Funnel (TV-Funnel).....	93
Tableau 3.8 : Valeurs du rapport H2/H1, T20 et T40 de l'essai de L-Box.....	95
Tableau 3.9 : Valeurs de la laitance des mélanges en fonction de la teneur en laitier en %.....	98
Tableau 3.10 : Résistance à la compression à 28 et 90 jours des différents bétons étudiés.....	99
Tableau 3.11: Résultats de l'absorption d'eau par capillarité et sorptivité des BAP en fonction de la teneur du laitier.....	103
Tableau 3.12 : Résultats de la perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure.....	109
Tableau 3.13 : Résultats de la porosité ouverte Pw en fonction de la teneur en laitier et la	112

durée de cure.....



## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

$A_{bG}$	Coefficient d'absorption du gravier
$A_{bs}$	Coefficient d'absorption du sable
BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton de Haute Performance
$B_j$	Différence d'Hauteurs de béton au J-Ring
BLAP	Béton léger autoplaçant
BO	Béton ordinaire
BV	Béton Vibré
C	Ciment
C+A	Ciment+Addition
$Ca CO_3$	Carbonate de calcium
CEM I 42,5	Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5
CEM II	Ciment Portland composé
CEM III	Ciment de haut-fourneau
$CO_2$	Dioxyde de carbone
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
CV	Cendres volantes
$C_{vol}$	Le pourcentage en volume du ciment, (%)
$D_{max}$	Diamètre maximal des Granulats
E	Eau
$E/(C+A)$	Eau / (Ciment+Addition)
E/C	Eau/Ciment

E/L	Eau/Liant
$E_{\text{eff}}$	La quantité d'eau efficace, (kg)
$E_{\text{vol}}$	Le pourcentage d'eau en volume, (%)
F/L	Filler calcaire/liant
FA	Fly ash
G	Gravier
G/S	Gravier/Sable
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LF/C	Limestone fillers / cement
MBE	Mortier de Béton Equivalent
MK	Métakaolin
MOR	Mortier
NC	NormalConcrete
PC	Polycarboxylate
PZN	Pouzzolane naturelle
REF	Référence
RHZ	Cendres de riz
$R_m$	Vitesse relative
S/M	Sable/Mortier
SCC	Self-CompactingConcrete
SF	Slump flow
SP	Superplastifiant

SP/L	Superplastifiant/Liant
SP/P	Superplastifiant/Poudre
SSB	Surface Spécifique de Blaine
T <sub>20</sub>	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 20 cm, (sec).
T <sub>40</sub>	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 40 cm, (sec).
T <sub>50</sub>	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm, (sec).
T <sub>V-F</sub>	Temps d'écoulement à l'entonnoir, (sec).
V	Volume, (m <sup>3</sup> )
VC	Vibratedconcrete
VF	ViscosityFunnel
V <sub>p</sub>	Volume de poudre, (m <sup>3</sup> ).ΓΓΓ
VS	ViscositySlump
V <sub>sable</sub> /V <sub>mortier</sub>	Volume du sable /volume du mortier
V <sub>w</sub>	Volume d'eau, (m <sup>3</sup> ).
w/p	Water/powder
W <sub>eff</sub>	Eau efficace
W <sub>eff</sub> / C	Eau efficace / ciment
wt	weight
γ	Le taux de cisaillement, (s <sup>-1</sup> )
Γ <sub>m</sub>	Etalement relatif

$\eta$	La viscosité, (Pa.s <sup>-1</sup> )
$\eta_p$	la viscosité plastique, (Pa.s <sup>-1</sup> )
$\rho_{abs}$	Masse volumique absolue, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{app}$	Masse volumique apparente, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_C$	Masse volumique du ciment, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_E$	Masse volumique d'eau, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_G$	Masse apparente du gravier, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_S$	Masse volumique du sable, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{SP}$	Masse volumique du superplastifiant, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\tau$	Contrainte de cisaillement, (Pa)
$\tau_0$	Seuil de cisaillement, (Pa)
$\Pi$	Pourcentage de laitance, (%)
%P	Le pourcentage du volume de pate dans le ciment, (%)
$\mu_G$	L'humidité du gravier, (%)
$\mu_S$	L'humidité du sable, (%)

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau utilisé depuis des millénaires à cause de la facilité de sa fabrication, de sa simple mise en place à l'état frais, de ses propriétés mécaniques et de sa durabilité à l'état durci. Parmi les différentes familles de béton, le béton autoplaçant (BAP).

Le BAP est un béton très fluide qui se met en place par gravité sans apport extérieur ou intérieur de vibration. Ce matériau est notamment employé pour la réalisation de la construction civile, bâtiment, travaux publics et les ouvrages d'art. L'intérêt de ce type de béton réside dans l'absence de nuisance sonore en milieu urbain, la possibilité de bétonner des zones extrêmement ferraiillées, une plus grande sécurité sur les chantiers, une excellente qualité des parements et une réduction des coûts des processus industriels.

La performance des BAP à l'état durci est relativement bien étudiée. Cependant, l'effet du climat chaud comme celui de l'Algérie est rarement étudié. Le bétonnage par temps chaud, c'est quand le béton est malaxé, transporté, et mis en place dans une température ambiante élevée, une faible humidité et sous une radiation solaire ou exposé au vent. La qualité du béton peut être négativement influencée par les conditions climatiques quand des précautions ne sont pas prises. L'effet de la haute température et la faible humidité relative se traduit par une augmentation de la température du béton frais, augmentation d'autant plus marquée que les températures respectives de ses constituants sont élevées. Par conséquent, la demande en eau est plus importante pour maintenir la consistance visée, des difficultés de mise en place, de serrage et de finition sont accrues et la tendance à la fissuration plastique augmente. Dans le cas où l'eau est ajoutée pour supprimer les difficultés décrites à l'état frais. Ceci peut conduire à un retrait de séchage accru ainsi qu'à une fissuration thermique, des résistances mécaniques plus faibles, une durabilité amoindrie.

Dans ce mémoire nous nous intéressons à l'effet du climat chaud sur les performances des bétons autoplaçants.

Le mémoire est décomposé en trois chapitres, le premier chapitre présente une étude bibliographique qui sera focalisée sur le climat chaud et les différents paramètres intervenant dans les conditions climatiques qui influent sur le béton. La première partie décrit aussi l'effet du climat chaud sur les performances du béton en termes d'ouvrabilité et

de rhéologie ainsi que les propriétés mécaniques et la durabilité. La deuxième partie est présente certaines notions fondamentales relatives aux caractéristiques des bétons autoplaçants et l'influence des conditions climatiques sur les propriétés mécaniques, physico-chimiques et durabilité des BAP.

Le deuxième chapitre présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation du BAP ainsi que les différents essais réalisés en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire.

Le troisième chapitre présente et discute les différents résultats obtenus de cette étude expérimentale.

Enfin, des conclusions générales ainsi que les perspectives de cette étude sont proposées.

## **CHAPITRE01 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : PERFORMANCE DU BETON EN CLIMAT CHAUD**

### 1.1 Généralités

Dans ce chapitre, on présente une revue bibliographique sur les propriétés mécaniques du béton ordinaire et béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci ainsi que sa durabilité sous l'effet d'un climat chaud.

### 1.2 Climat chaud

#### 1.2.1. Définition

Le temps chaud peut être défini comme toute période à température élevée, dans laquelle des précautions doivent être prise en compte pour assurer un bon malaxage, transport et durcissement du béton. Les problèmes de temps chaud sont plus fréquemment rencontrés courant de l'été, mais il existe d'autres facteurs climatiques associés comme les grands vents, faible humidité relative et le rayonnement solaire qui peuvent se produire à tout moment, en particulier dans les climats arides ou tropicaux. Les conditions de temps chaud peuvent produire un taux rapide d'évaporation de l'humidité de la surface du béton.

Le climat chaud se caractérise par une température élevée, faible humidité et une forte radiation solaire. En outre, l'environnement de l'Algérie connaît de grandes fluctuations quotidiennes de température et d'humidité ainsi que des vents persistants.

#### 1.2.2. Facteurs climatiques agissants sur le béton par temps chaud

##### a. Température

Les conditions climatiques ont une grande influence sur la qualité finale du béton. Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures élevées dès la préparation du béton, puis pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité.

Les températures élevées sont le terrain favorable à l'évaporation de l'eau du béton et à sa dessiccation. Elles ont également pour effet d'accélérer la prise et le durcissement. Cet affaiblissement mécanique avec l'évaporation de la température .de plus, d'importance variations journalières peuvent induire des contraintes thermiques non négligeables, particulièrement nuisibles durant l'amorce durcissement [1].

La température en l'Algérie souvent à 35 °C dans les zones côtières et plus dans le sud qui peut atteindre 50°C durant le mois de mai, juin, juillet et août (les mois les plus chauds de l'année). La température maximale moyenne en été peut s'élever à 45 °C, tandis que le minimum varie de 25 à 35 °C. Lorsque cette température ambiante élevée est associée à environ 11 heures de soleil direct, il est compréhensible que la température de surface du béton et le coffrage puisse être beaucoup plus élevée. En outre, une variation de la température ambiante jusqu'à 20 °C en particulier quand il est jeune [2].

#### b. Humidité relative

Des changements radicaux de la température de l'air sont accompagnés par des modifications majeures de l'humidité relative. L'évaporation est d'autant plus forte que cette humidité est faible ; elle est à relier à la quantité d'eau que peut théoriquement absorber un béton pour atteindre sa saturation, ou capacité restante d'absorption d'eau de l'air.

Si la faible humidité relative par temps chaud et sec est susceptible d'entraîner une perte excessive d'eau du béton frais, il faut également se préoccuper dans quelle plage elle peut varier. En effet, d'importantes variations journalières de l'humidité relative sont à l'origine de cycles condensation-séchage pour les surfaces exposées du béton. Cela a des conséquences sur sa durabilité [1].

#### c. Rayonnement solaire

La température de l'air dépend directement du rayonnement solaire en absence de nébulosité et de pluie. Dans ce cas, le rayonnement direct va provoquer l'élévation de la température des matériaux de base stockés (ciment, granulats et eau). L'ensoleillement induit également à l'élévation de la température des coffrages et des cages d'armatures et le site lui-même, dans lequel se déroule le chantier s'est fortement réchauffé. Il en résulte une augmentation de température du béton frais.

Après la mise en place et le serrage du béton, le rayonnement solaire direct conduit à une évaporation rapide de l'eau des surfaces exposées et fait surgir un risque de fissuration par retrait plastique, ce qui nécessite un mode de cure rigoureux. Par temps chaud, la nébulosité et la pluie diminuent l'effet du rayonnement solaire puisqu'elles en absorbent une partie. En termes de conditions ambiantes, il s'ensuit la diminution de la température et l'augmentation de l'humidité relative. Cela a pour effet de limiter l'évaporation [1].

#### d. Évaporation : la conjonction des paramètres précédents

Comme nous l'avons vu, chaque facteur décrit auparavant et pris isolément, contribue à l'évaporation. L'action conjuguée de ces facteurs ne fait donc qu'amplifier ce phénomène



et c'est la raison pour laquelle il faut les considérer dans leur ensemble. C'est cet ensemble qui définit le temps, mais surtout son évolution : les changements, tels que la brusque arrivée du vent avec une forte chute de température, sont particulièrement importants. Ce sont des situations météorologiques critiques qui peuvent survenir en été, de juin à septembre dans nos régions.

L'évaporation est le paramètre préoccupant lors du bétonnage par temps chaud. L'évaporation est la conversion de l'eau, de l'état liquide à l'état gazeux, à une température inférieure au point d'ébullition, et sa diffusion dans l'atmosphère. Elle se produit lorsque la surface de l'eau est exposée à un air non saturé. Dans le cas du béton frais, la surface d'eau est créée par le phénomène de ressuage [1].

L'effet combiné de la température, de l'humidité relative et du vent, est généralement estimé par l'abaque présenté sur la figure 1.1. Cette dernière permet de déterminer et d'évaluer un débit d'évaporation de l'humidité superficielle d'un béton (en  $\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$ ), connaissant la température ambiante et celle du béton, l'humidité relative de l'air ainsi que sa vitesse de renouvellement. De cet abaque et de l'expérience, il est reconnu qu'à partir d'un débit d'évaporation de  $1 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{h}$ , des précautions sont à prendre pour éviter les risques de fissuration plastique.

### 1.3. Influence du climat chaud sur les performances du béton à l'état frais

Les caractéristiques d'un climat chaud présentées précédemment sont responsables de l'élévation de la température du béton frais :

- Lors du malaxage, la température des constituants ou du malaxeur s'ils sont exposés au rayonnement solaire.
- A la mise en place, par exemple la durée de transport importante et de coffrage également exposés au rayonnement solaire.

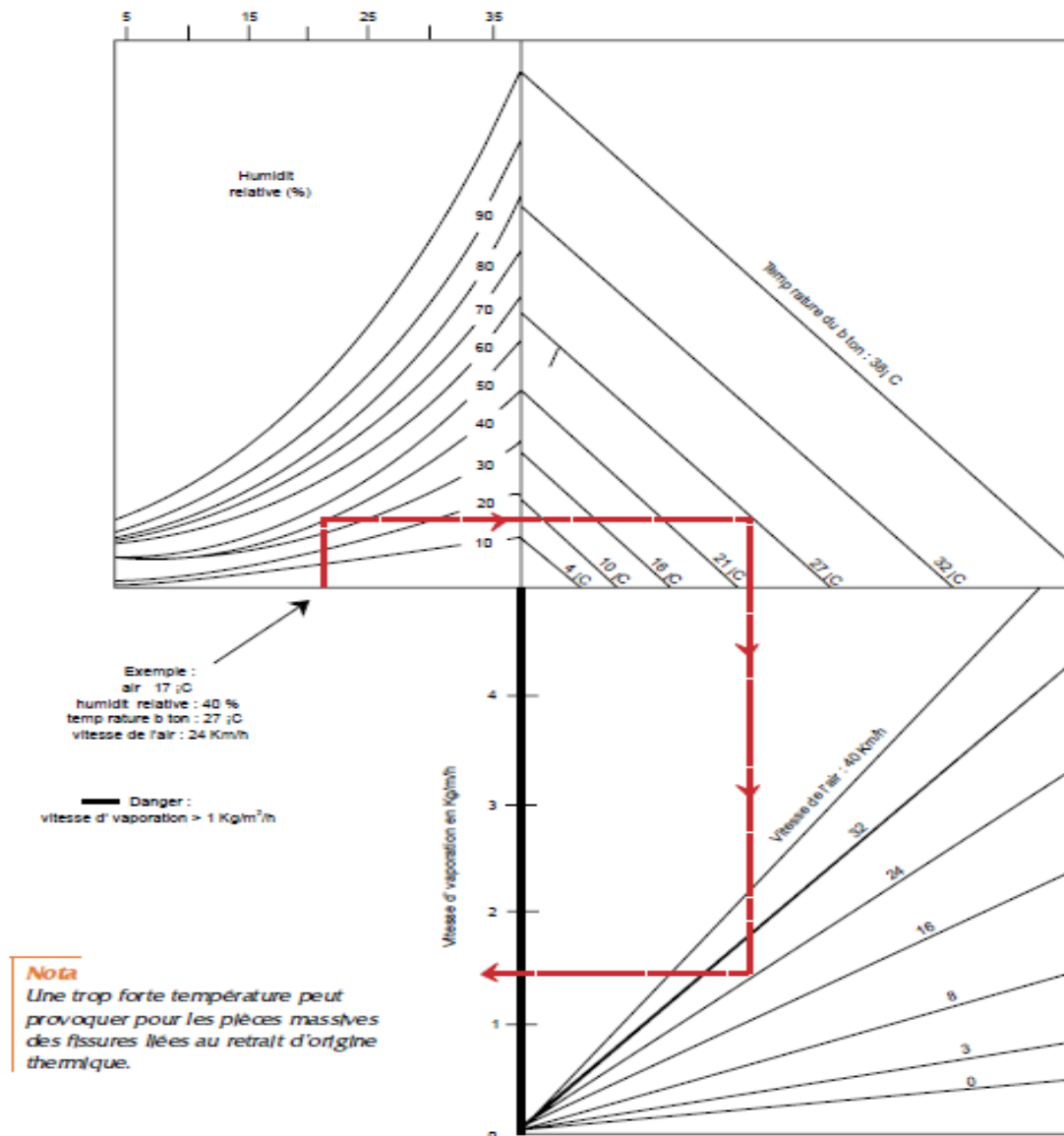


Figure 1.1 : Vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité relative, vitesse du vent et température du béton) [3].

### 1.3.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité est l'aptitude du béton à remplir au mieux les coffrages qui lui sont offerts tout en gardant son homogénéité. L'ouvrabilité est donc une propriété qui regroupe plusieurs caractéristiques du béton frais telles que la consistance, l'étalement, la capacité d'écoulement, le pompage, la mobilité, le compactage. Ces caractéristiques conditionnent aussi la résistance et la durabilité du béton durci.

L'ouvrabilité dépend de la quantité d'eau, la qualité des granulats et la grosseur des grains. L'ouvrabilité du béton peut être évaluée par le cône d'Abrams, la table à choc, le Vebe et

le maniabilimètre LCPC. Pour une composition donnée d'un béton, la maniabilité est caractérisée par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams [3].

L'optimisation d'une composition du béton permet d'ajuster le dosage des constituants et surtout le rapport E/C pour une consistance visée. Ce sont des essais d'étude effectués au laboratoire à 20°C. Lorsque la température augmente, elle conduit à une augmentation de la température du béton frais. Cette élévation de température conduit à une accélération du processus d'hydratation qui rend le béton plus ferme dès les premiers instants de sa confection.

L'augmentation de la température du béton est une cause de perte de maniabilité et chaque constituant y participe différemment en liaison avec son dosage et sa chaleur massique [3]. Par exemple, on retiendra, toute chose égale par ailleurs, que dans le domaine courant :

- Une augmentation de 10°C du ciment élève de 1°C la température du béton.
- Une augmentation de 10°C de l'eau élève de 2°C la température du béton.
- Une augmentation de 10°C des granulats élève de 7°C la température du béton (Figure 1.2).

Avec l'accroissement de la température du béton, les propriétés physico-chimiques du matériau sont sensiblement modifiées.

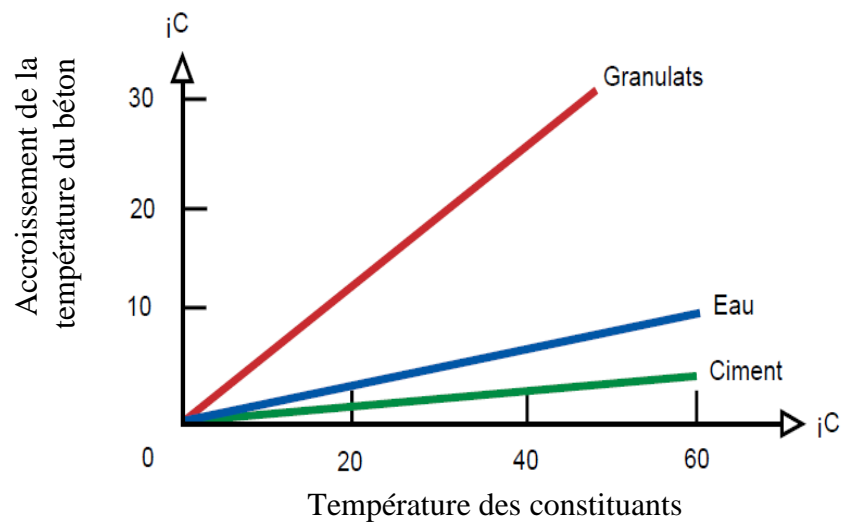


Figure 1.2 : Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants [3].

Mamillan et al. [3] ont montré qu'une augmentation de 11°C de la température du béton entraîne une réduction de l'affaissement de 25 mm et la quantité d'eau afin de compenser

cette réduction augmente d'autant plus que la température du béton est plus élevée (Figure 1.3). Aussi elle entraîne une augmentation de la demande en eau  $6.5\text{l/m}^3$  (Figure 1.4).

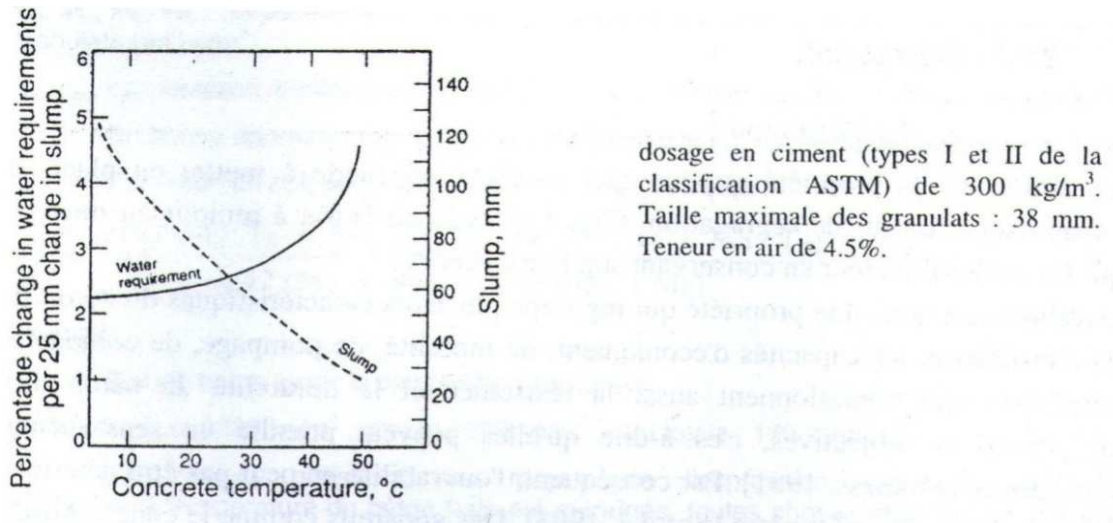


Figure.1.3 : Effet de la température du béton sur l'affaissement et sur la quantité d'eau nécessaire lorsque l'affaissement varie de 25 mm [1].

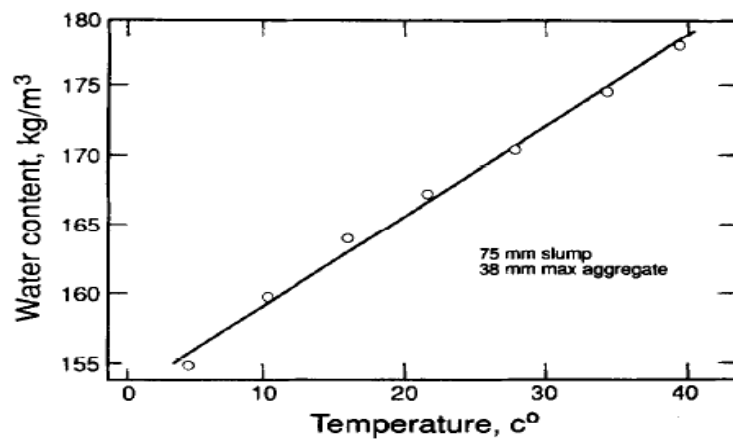


Figure 1.4 : Effet de la température du béton sur la quantité d'eau requise pour maintenir un affaissement de 75 mm [1].

Venuat [4] rapporte qu'un complément de  $7\text{ à }10\text{ l/m}^3$  en moyenne, est nécessaire pour maintenir la consistance, lorsque la température du béton frais s'élève de  $10^\circ\text{C}$ .

Selon Mather [5], quelle que soit la température, une quantité d'eau donnée correspond à un affaissement déterminé à la fin du malaxage, mais si le temps s'écoule entre la fin du malaxage et le moment où l'on mesure l'affaissement, la perte de ce dernier sera plus grand lorsque la température est élevée (Figs. 1.5 à 1.7).

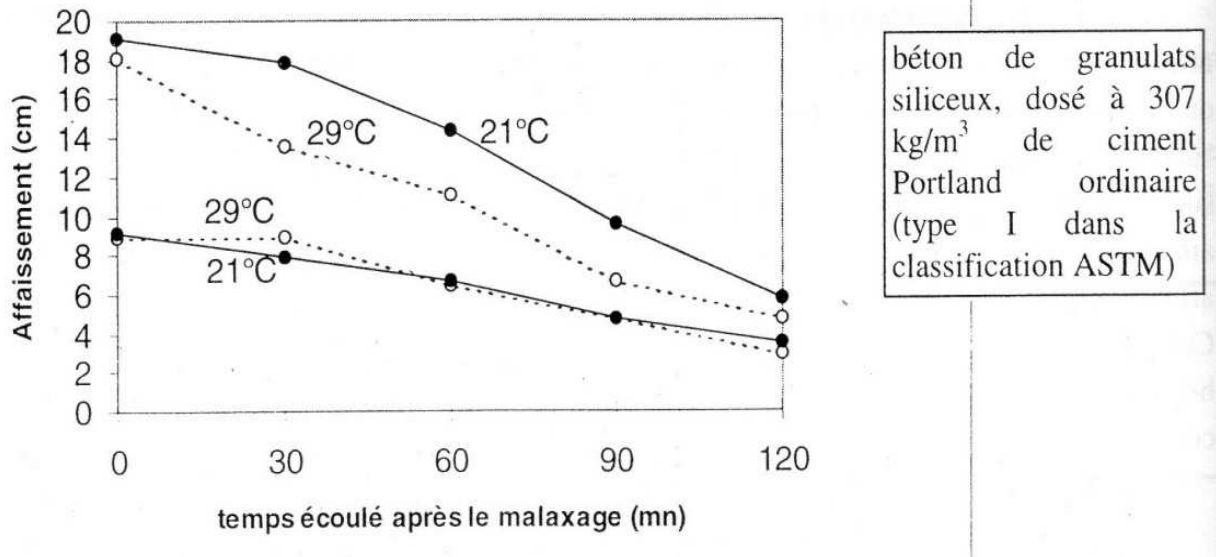


Figure 1.5 : Evolution de la perte de l'affaissement dans le temps en fonction de la température du béton frais et de la valeur de l'affaissement initial [1].

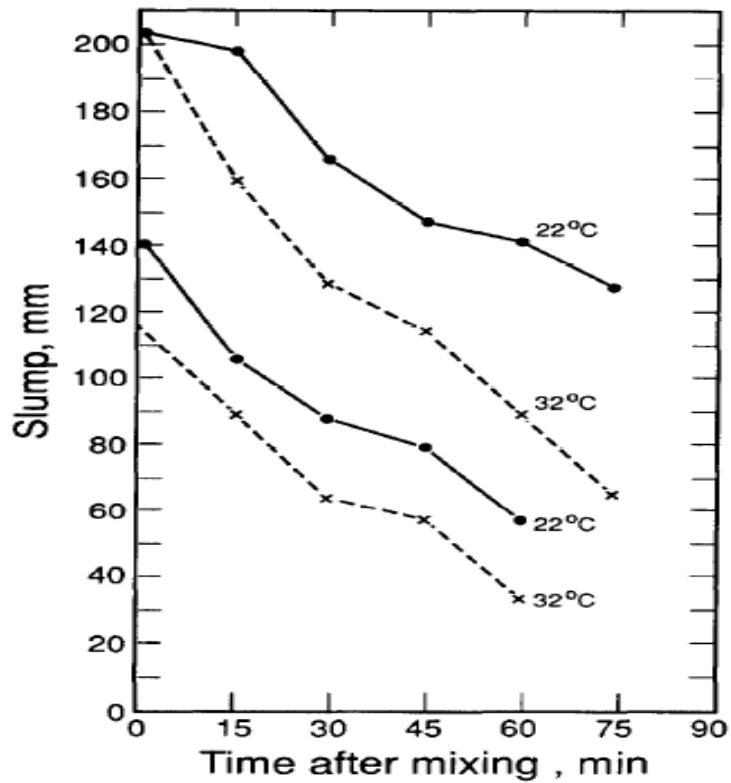


Figure 1.6 : Effet de la température sur la perte d'affaissement des bétons plastique coulé à une température de 22°C et 32°C [6].

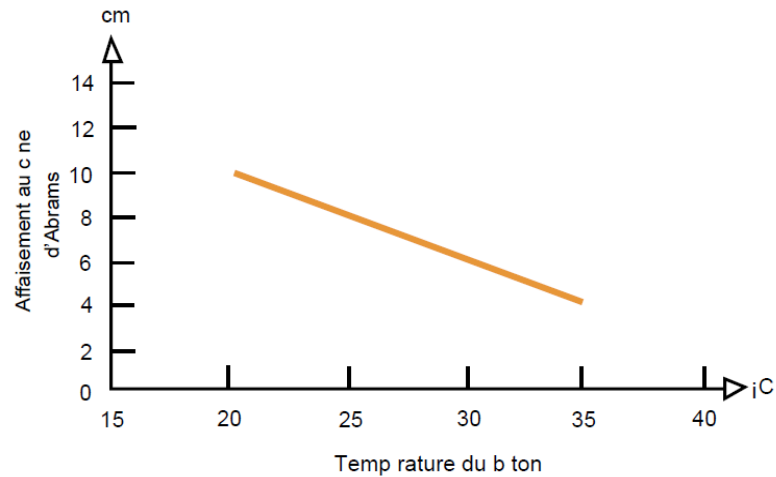


Figure 1.7 : Evolution de l'affaissement au cône en fonction de la température [3].

### 1.3.2. Temps de prise

C'est le temps de cohésion de la pâte de ciment et le passage de l'état moulable à l'état rigide. Lors de ce passage on distingue deux repères : le temps de début de prise et le temps de fin de prise. Ces repères sont déterminés à l'aide de l'essai de Vicat [7].

Par temps chaud, l'élévation de la température du béton a pour effet de diminuer le temps de début et de fin de prise, et donc réduire la période pendant laquelle le béton peut être mis en œuvre. Donc les réactions chimiques entre le ciment et l'eau sont thermo-activées. Sa vitesse est plus rapide lorsque la température s'élève (Fig. 1.8).

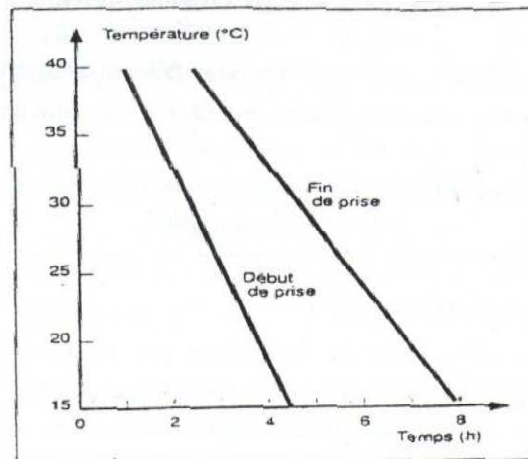


Figure 1.8 : Influence de la température sur le début et la fin de prise d'un CPA (CEM I 32.5) [8].

Ahmadi [9] a observé que lorsque la température augmente, il y aura une diminution dans le temps initial de prise du béton. Avec l'augmentation de l'humidité sur le terrain, le temps de prise initial de béton augmente. L'augmentation de la vitesse d'air sur le terrain, implique une diminution du temps de prise initiale du béton (Fig. 1.9). L'auteur rapporte

des effets similaires de temps de fin de prise à ceux de temps de prise initiale du béton (Fig. 1.10).

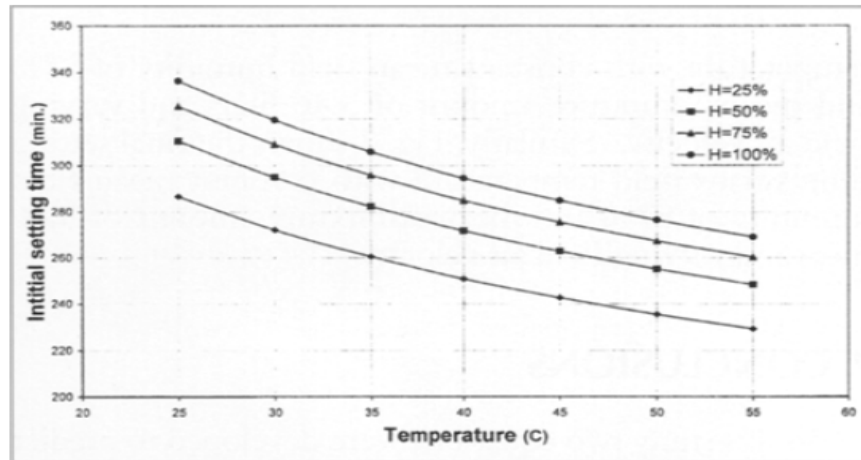


Figure 1.9 : Effet de la température sur le temps de début de prise [9].

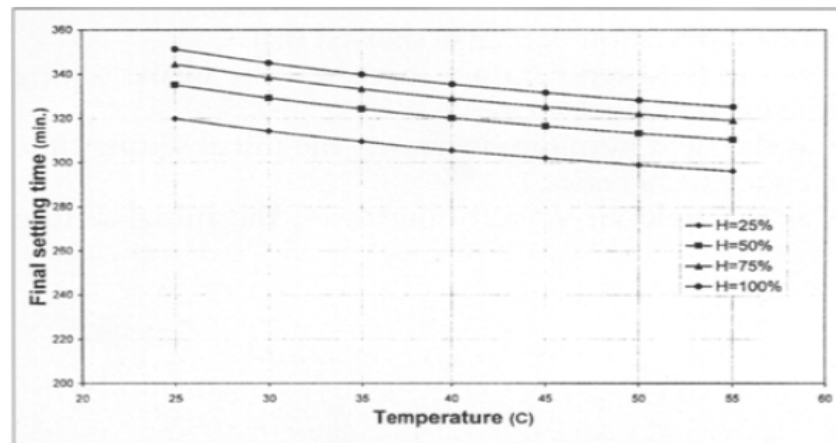


Figure 1.10 : Effet de la température sur le temps de fin de prise [9].

### 1.3.3. Retrait plastique

Le retrait du béton est défini comme une déformation volumique du matériau, au cours de son durcissement, induite par des phénomènes physicochimiques liés à l'hydratation de la pâte de ciment et au séchage. A l'état frais, le retrait plastique se manifeste suite à une évaporation trop rapide de l'eau du béton entraînant ainsi, quelques heures après le décoffrage, des fissures de retrait plastique. Dans la pratique, il est conseillé de ne pas dépasser une vitesse d'évaporation supérieure à  $1\text{kg/m}^2/\text{h}$ . elle est d'autant plus importante que :

- La température ambiante est élevée,
- La température du béton augmente,
- L'air est sec [3].

Le retrait plastique, appelé aussi retrait avant prise ou retrait capillaire, est une déformation qui se manifeste tant que le béton est plastique, à un moment où la pâte est encore déformable. Donc avant et/ou pendant la prise et sous l'effet d'une dessiccation ou d'une auto-dessiccation; une fissuration à la surface externe de l'ouvrage peut se former après le placement ou durant la finition. L'importance du retrait plastique est influencée par la vitesse de dessèchement qui dépend à son tour de la température de l'air et du béton, de l'humidité relative et de la vitesse du vent. Les fissures apparaissent dans le béton lorsque le retrait empêché dépasse sa capacité de déformation. Une grande partie des bétons est destinée aux applications horizontales comme les dalles, d'où un faible rapport volume sur surface et donc un retrait plastique élevé.

#### 1.4. Propriétés mécaniques du béton durci

##### 1.41. Résistance à la compression

La résistance du béton dépend de plusieurs paramètres tel que la pâte de ciment, les granulats, la liaison pâte granulat et la concentration granulaire dans le béton. Mouret et al. [10] ont montré que dans un béton ordinaire, les propriétés mécaniques des granulats sont supérieures à celle de la pâte de ciment. La résistance du béton dépendra de la résistance de la pâte et sa liaison au granulat. La pâte de ciment est liée à sa structure poreuse, ses propriétés dépendent du rapport E/C et du degré d'avancement des réactions d'hydratation selon Soroka [11].

La température élevée et le possible départ d'eau par évaporation selon la valeur de l'humidité relative exercent des actions opposées sur les propriétés mécaniques du béton, dès le jeune âge. Ramezani pour et Malhotra [12] ont observé que le gain de résistance initiale obtenu par les bétons durcis à 38 °C et 65% d'humidité relative en comparaison avec celle des bétons durcis sous cure humide ne sont pas maintenus à long terme. Les résistances à la compression à 180 jours sont significativement plus faibles que la résistance des bétons durcis dans une cure humide (Figs. 1.11 à 1.14). L'absence de durcissement du béton dans une cure humide affecte négativement sa résistance à la pénétration des ions de chlore et cela affecte sa résistance à la compression.



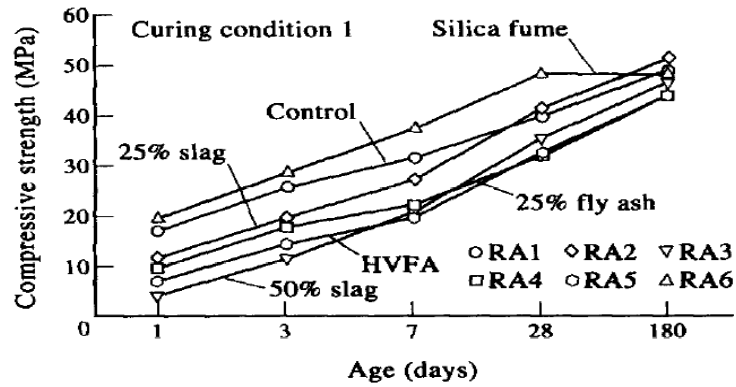


Figure 1.11 : Développement de la résistance à la compression du béton dans la cure humide [12].

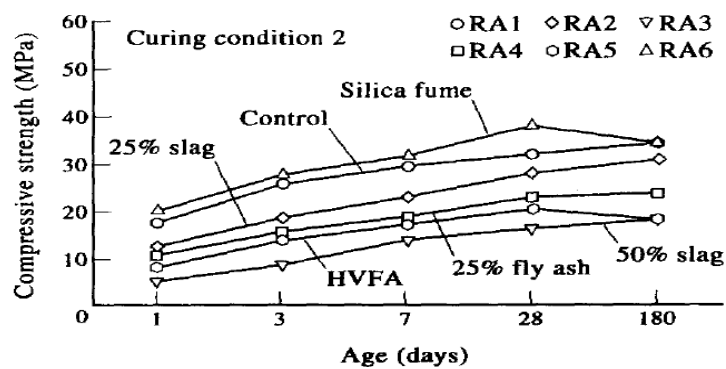


Figure 1.12 : Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après démoulage [12].

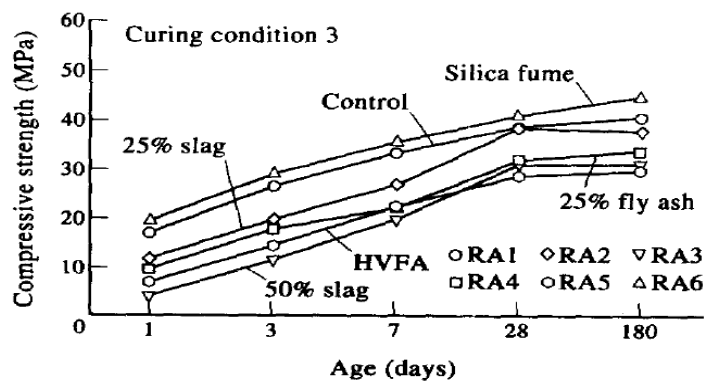


Figure 1.13 : Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après deux jours de cure humide [12].

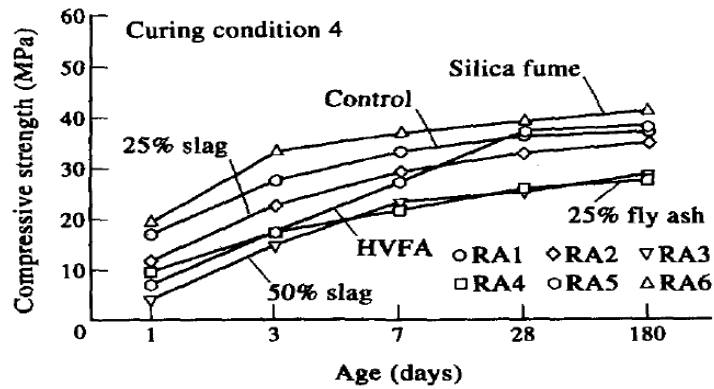


Figure 1.14 : Développement de la résistance à la compression du béton conservé à une température de 38°C et 65% d'humidité [12].

Shoukry et al. [13] ont montré une effet similaire de l'effet de l'augmentation de température qui donne une réduction de la résistance du béton à la compression, à la traction ainsi que le module d'élasticité correspondant (Fig. 1.15).

La cure du béton provoque une augmentation de résistance à la compression du béton, à la traction et le module d'élasticité correspondant (Fig.1.16). Il est recommandé lors de la conception des structures en béton de prendre en compte la variabilité des propriétés du béton avec les variations de température d'humidité qui pourraient influencer sur le comportement structurel, la résistance et la rigidité.

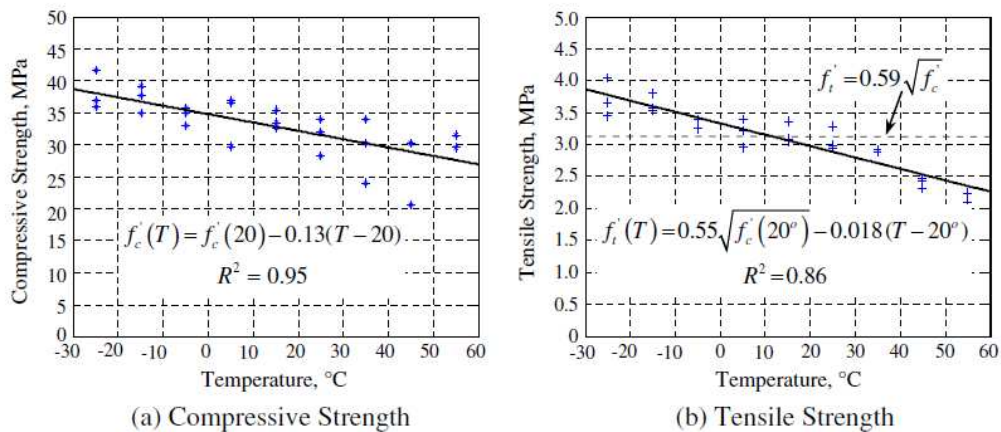


Figure 1.15 : Effet de la température sur la résistance à la compression et à la traction à 28 jours [13].

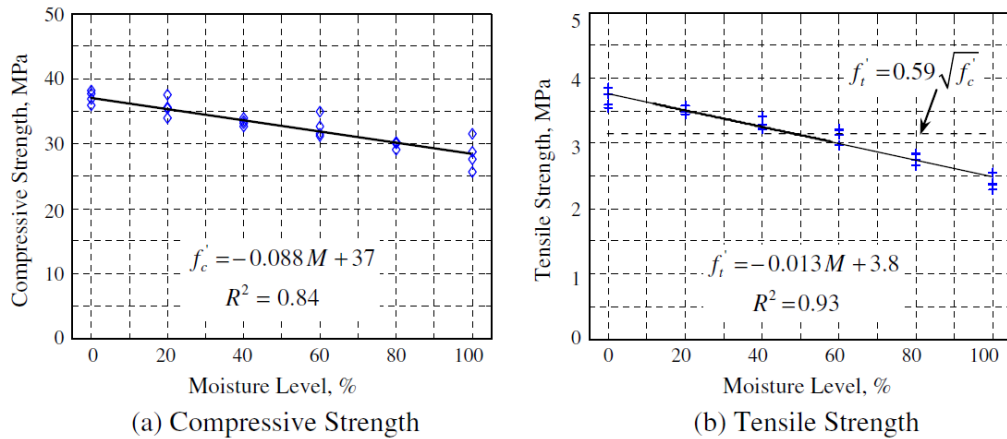


Figure 1.16 : Effet du degré de saturation sur la résistance à la compression et à la traction à 28 jours [13].

Bakir et al. [14] ont constaté que le climat sec influe négativement sur la résistance caractéristique des mortiers (Figs. 1.17 & 1.18). Ceci est dû à l'évaporation rapide d'une quantité d'eau des couches superficielles, ce qui entraîne des microfissures dans la matrice cimentaire surtout en présence d'une température élevée. Alors que dans le climat humide l'évaporation est limitée et la procédure d'hydratation se poursuit d'une manière continue. Ceci veut dire que l'humidité joue un rôle primordial dans le développement de la résistance à la compression, même en présence d'une température assez élevée.

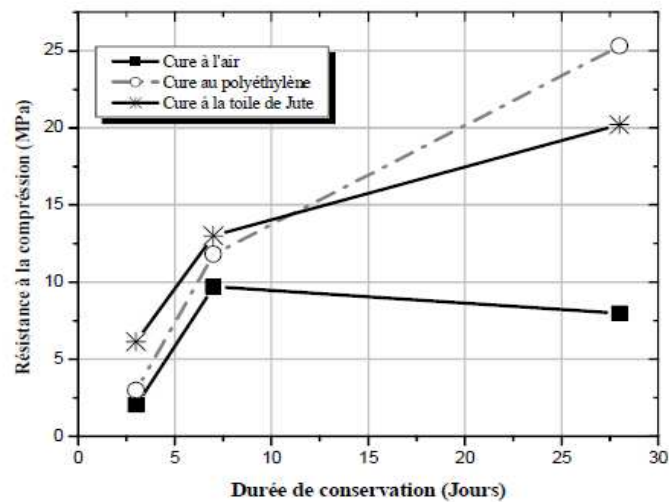


Figure 1.17 : Influence des méthodes de cure sur la résistance  $f_c$ , des éprouvettes conservées à l'air libre [14].

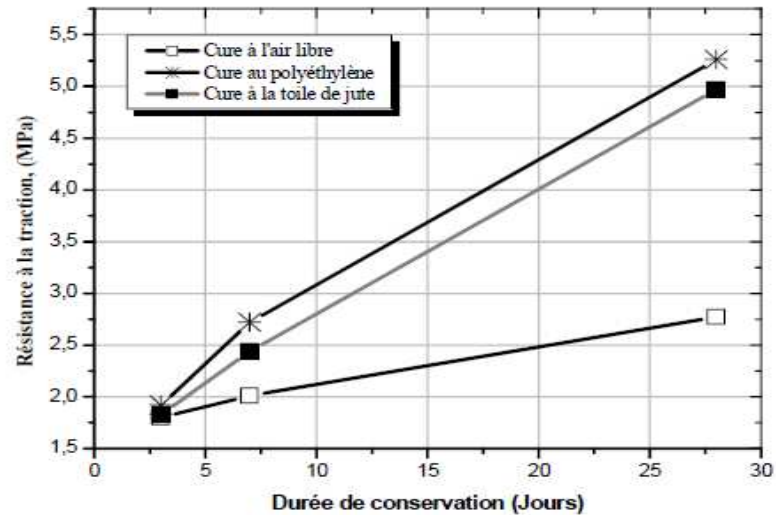


Figure 1.18 : Influence des méthodes de cure sur la résistance  $f_t$ , des éprouvettes conservées à l'air libre [14].

Cebeci [15] a analysé l'effet de l'augmentation de la température de durcissement de 17 à 37°C simultanément avec l'insuffisance de l'humidité relative du support de séchage (à partir de saturation de 75% et 33%) sur le développement de la résistance dans le béton. Il a montré que le manque de l'humidité, plutôt que l'augmentation de la température, est le facteur le plus préjudiciable.

D'après Al-Ani et al. [16], le retard de cure du béton par temps chaud a un effet négatif sur la résistance à la compression, et le premier jour de retard de cure a le plus grand effet. La cure initiale est plus efficace pour les bétons avec un dosage de ciment élevé. Une période minimale de cure de 3 jours est suffisante par temps chaud, tandis qu'une période de cure minimale de 7 jours est nécessaire pour le béton avec faible teneur en ciment (Fig. 1.19).

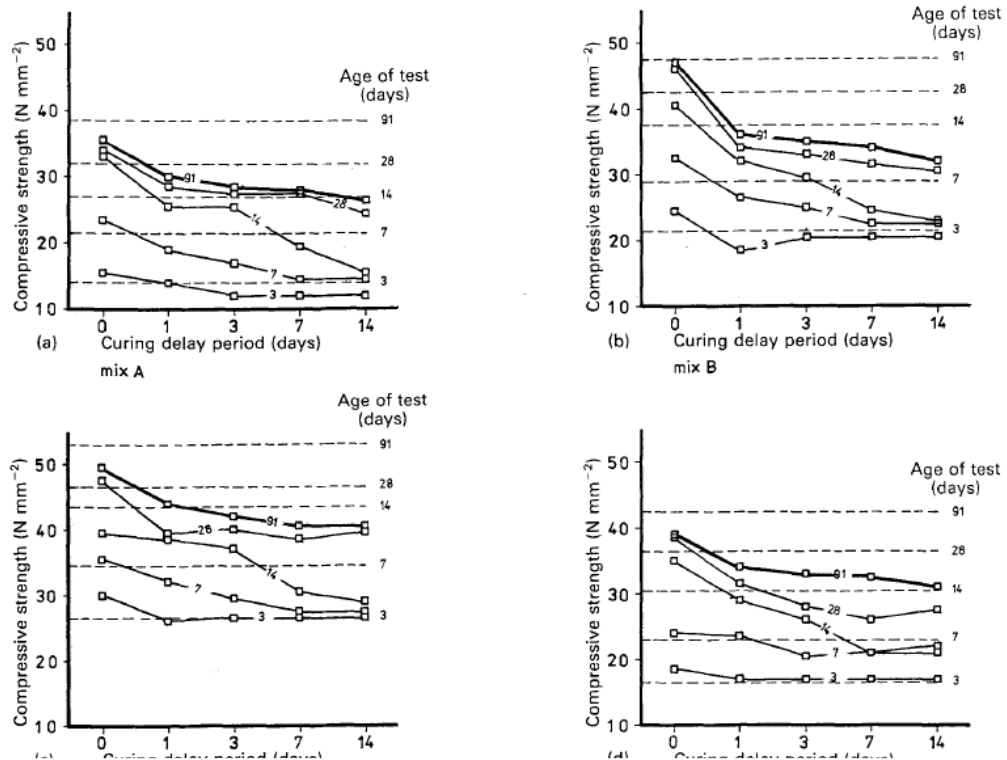


Figure 1. 19 : Effet de la période de cure sur la résistance à la compression du béton,

(---)cure à l'eau à l'intérieur du laboratoire, (\_\_\_) cure en dehors de la toile de jute [16].

Selon Balendran et Martin-Buadesla [17], la cure du béton ordinaire à des températures élevées améliore le développement de la résistance initiale du béton. La substitution partiel du ciment par les cendres volantes améliore sa résistance initiale à la compression et à la traction et a également sa résistance à la flexion.

Lachmat et Kenai [18] ont montré que la durée de cure a un effet positif sur la résistance à 28 jours. En effet les meilleures résistances approchant la référence ont été obtenues pour la durée maximale de 14 jours de cure, surtout pour l'environnement aride. Un jour et trois jours de cure n'ont pratiquement pas d'effet sur la résistance dans cette zone. La toile de jute régulièrement mouillée et maintenue pendant 14j a donné des résultats satisfaisants sans pour autant avoisiner la valeur de référence.

A l'aire libre, 3 jours de cure donnent des résultats comparables à la résistance de référence, tandis qu'en zone semi aride il en faut 7 jours pour avoir les même valeurs. La toile de jute régulièrement humidifiée donne les meilleurs résultats surtout en zone méditerranéenne.

#### 1.4.2. Effet de laitier sur la résistance à la compression

Kriker [19] a rapporté qu'à court terme (pour une durée inférieure à 7 jours) le béton au laitier présente une résistance mécanique inférieure à celle du béton ordinaire. A long terme et pour une durée supérieure à 90 jours, les bétons aux laitier conservés dans les conditions suivantes :

- cure normale dans l'eau douce ( $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ )
- à l'air libre ( $T= 15$  à  $35^{\circ}\text{C}$ ) après une cure dans l'eau pendant 7 jours.
- à l'étuve (température cyclique entre 15 et  $45^{\circ}\text{C}$ ), et une cure initiale de 28 jours dans l'eau douce ;

Le béton développe une résistance supérieure à celle du béton ordinaire. Cependant, pour les deux premiers types de cure le béton contenant 30% de laitier est le plus performant. Pour la cure à l'étuve, le béton contenant 60% de laitier présente la résistance mécanique la plus élevée.

Amrane et Kenai [20] ont trouvé qu'en absence de cure humide le développement de la résistance à la compression des bétons aux laitier et du béton témoin en climat chaud s'effectuent d'autant plus rapidement que la température de l'environnement augmente, mais d'une manière irrégulière, sans que les résistances recommandées ne soient atteintes, même à 90j.

Dans l'environnement réel (à Ain-Ouessara), après 7j de cure initiale, les résistances des bétons aux laitier n'ont jamais atteint celles du béton témoin, même à 90j. L'effet est dû probablement à une fluctuation de la température et le manque d'humidité dans un tel environnement et aussi à l'insuffisance de la période de cure.

La résistance à la compression des mortiers à base de ciments au laitier d'El Hadjar reste faible à jeune âge, mais se développe assez bien à long terme pour des taux de substitution n'excédant pas les 30%.

- À 90 jours, un taux de substitution de 50% conduit à une augmentation de la perméabilité à l'oxygène, mais un taux de 30 % de laitier ne l'affecte que légèrement. Contrairement, au long terme (360 jours), les mortiers au laitier (particulièrement le M50) ont enregistré une diminution de la perméabilité.

- Après 90 jours de cure humide, la présence du laitier étudié a conduit à une réduction de la perméabilité des ions chlorés, que ce soit en termes de diffusion ou de conduction. Cet effet est plus appréciable pour un taux de 50% de laitier [21].

### 1. 5. Durabilité des bétons

La durabilité est définie comme la résistance du béton aux agressions chimiques ou physiques, en maintenant son comportement et ses performances dans des bonnes conditions de service prévus pour l'ouvrage.

La durabilité des structures en béton est influencée non seulement par les chargements mécaniques mais aussi par l'environnement (climat chaud, marin, pluie, gel dégel ...ect). Ces influences deviennent plus importantes quand on doit garantir une durée de service pendant une grande période.

La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts d'agents agressifs à l'intérieur d'un matériau poreux comme le béton. Les caractéristiques du réseau poreux déterminent les propriétés de transfert et elles sont donc des indicateurs de premier ordre dans la prédiction de la durabilité des structures en béton. 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 trois principaux mécanismes de transfert des fluides à l'intérieur du béton sont la perméation, la diffusion et l'absorption. La perméation concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression. La diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'action d'un gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires. Donc la durabilité en général est relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant.

En général, de 20 à 50 % du volume de la pâte est constitué par des pores. Le volume et la forme des vides influent sur la qualité des matériaux durcis. On distingue conventionnellement deux (2) types de pores :

- Les macropores (pores capillaires), constituées par des vides entre les hydrates et les anhydres (la taille  $D > 10^{-2} \mu m$ ).
- Les micropores (pores du gel), constituées par des vides dans les gels hydratés (la taille  $D < 10^{-2} \mu m$ ).

Les pores capillaires occupent la plupart du volume de vide dans le matériau, ils conditionnent les mécanismes de transfert. Leur volume diminue progressivement au cours de l'hydratation et dépend en grande partie du rapport eau/ciment (E/C).

Le mécanisme de dégradation chimique du béton consiste à une déclassification progressive du béton au cours du temps en contact avec un environnement agressif. Cette dégradation provoque une augmentation de la porosité du béton qui modifie ces propriétés physico-chimiques et mécaniques. D'une part cette augmentation de la porosité accélère le processus de transport (perméabilité ou diffusion) de matières et entraîne une accélération de la dissolution des hydrates (notamment la portlandite). D'autre part, ceci induit une modification des propriétés mécaniques comme la perte de résistance et la perte de rigidité. En plus, les sollicitations mécaniques créent des microfissures qui peuvent être des facteurs accélèrent le processus de dégradation chimique [22].

#### 1.5.1. Facteurs affectant la durabilité du béton

Les mécanismes principaux des transferts de fluides à l'intérieur du béton sont la perméabilité, la diffusion et l'absorption. La perméabilité concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression. La diffusion est le déplacement de fluide sous l'action du gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires.

##### a. La perméabilité du béton

La perméabilité d'un milieu poreux correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité représente le premier indicateur de la durabilité du béton. Elle dépend fortement de sa porosité et de sa connectivité [23].

Les trois principaux fluides qui peuvent pénétrer dans le béton et mettre en cause sa durabilité sont : l'eau pure ou contenant des ions agressifs, le gaz carbonique et l'oxygène. Ils peuvent se déplacer au travers du béton de différente manière, mais tous les mouvements dépendent principalement de la pâte de ciment.

Selon Ho et al. [24], la perméabilité est la propriété qui permet le passage d'un liquide à travers le matériau et elle se distingue de la pénétration de l'humidité par l'absorption due à l'action des capillaires. Dans les structures, l'eau est absorbée par capillarité, la mesure du taux d'absorption donne souvent une indication sur la structure des pores du béton ou du mortier. La pénétration de l'eau à travers le réseau poreux entraîne des ions sulfates et chlorures.

La perméabilité aux gaz est influencée par plusieurs paramètres lors de l'écoulement d'un gaz à travers un milieu poreux. La teneur en eau du béton a un effet marqué sur la majorité de ses propriétés dont la perméabilité est très affectée par la quantité d'eau



interstitielle. Il faut alors drainer l'eau interne, partiellement ou entièrement, avant qu'une mesure de perméabilité aux gaz ne puisse être réalisée [25].

D'après Perraton [26], la perméabilité peut aussi dépendre des caractéristiques propres du matériau et de sa microstructure. En effet, la dimension des pores dans le béton est directement liée au rapport E/C de la formulation étudiée. Lorsque le rapport E/C augmente, la porosité devient plus élevée et la structure poreuse plus grossière. Les transferts de matière de l'extérieur vers l'intérieure du béton sont alors facilités et la perméabilité du matériau s'amplifie.

#### b. Diffusion

La diffusion à travers le béton est due à l'agent agressif extérieur des ions du chlorures qui peuvent provenir de diverses sources (sels, eau de mer, nappe phréatique) et pénétrer dans le béton par diffusion et/ou par absorption.

Le phénomène de corrosion peut commencer, lorsque les ions des chlorures se retrouvent en quantité suffisante dans l'eau interstitielle du béton, ils engendrent une diminution du PH. Au voisinage des armatures en acier, cette diminution de PH détruit progressivement la couche protectrice (basique) des armatures. Dans ce cas la durabilité du béton armé dépend fortement de la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs [27].

#### c. Absorption

L'absorption capillaire est le transfert d'eau dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires. Ce mécanisme de transfert est lié à la structure poreuse et à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue par deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). Étant donné que le remplissage des capillaires et des vides ont lieu en même temps que la montée de l'eau durant l'absorption. L'absorptivité est influencée par le rapport E/C et le type d'ajout minéral utilisé dans la formulation du béton [27].

### 1.5.2. Effet du climat chaud sur la durabilité des bétons

#### a. Diffusion des ions du chlore et porosité

Ramezianpour et Malhotra [12] ont constaté que les bétons qui n'ont reçu aucune cure après démoulage montrent la plus mauvaise performance en termes de développement de résistance, de porosité et de résistance à la pénétration des ions du chlore. La cure humide continue du béton est indispensable pour obtenir une résistance élevée, une faible porosité

et une résistance plus élevée à la pénétration des ions de chlore. Dans une cure humide, la résistance du béton à la pénétration des ions de chlore est très élevée à un jour pour tous les bétons étudiés, et diminue avec le temps. Le béton témoin et le béton de 25% de laitier montrent des valeurs très élevées ( $Q > 1500$  Coulombs) même à 180 jours. Toutefois, le béton contenant 50% de laitier, 25% de cendres volantes ou 10% fumé de silice donnent des valeurs plus faibles de la charge à 28 et 180 jours. À 180 jours, les valeurs sont comprises entre 375 Coulombs pour le béton de cendres volantes et 734 Coulombs pour le béton aux fumées de silice, indiquant ainsi une très faible perméabilité des bétons. La forte diminution de la perméabilité du béton est due à la variation de la porosité de la structure hydratée de ciment à base d'ajouts cimentaires (Fig. 1.20).

Dans une chambre climatique ( $T=38^{\circ}\text{C}$  et  $\text{RH}=65\%$ ), tous les mortiers montrent une porosité totale significativement plus élevée par rapport aux valeurs obtenues pour l'état de cure humide. Les mortiers témoins sont les moins performants, c'est à dire plus de pourcentage cumulé de volume des pores d'environ 35%. Les autres mortiers également ont des mauvais résultats, avec un cumule total de porosité supérieure à 20% (Figure 1.21).

La cure dans une chambre climatique ( $T=38^{\circ}\text{C}$  et  $\text{RH}=65\%$ ) donne des valeurs très élevées de la charge à 180 jours quelle que soit l'âge. A 180 jours, la charge en coulombs était de 973, 1722 et 11268 pour respectivement les bétons à base de cendres volantes, fumée de silice et béton témoin. Le mortier témoin montre la plus faible porosité totale suivie par le mortier de 50% et 25% de laitier, mortier de la fumée de silice, mortier avec haute teneur en cendres volantes et mortier à base de 25% de cendres volantes. Les effets bénéfiques de l'utilisation de laitier, des cendres volantes et de fumées de silice ne sont pas reflétés par les résultats ci-dessus, parce que les réactions d'hydratation dans le cas du laitier, et les réactions pouzzolanique dans le cas des cendres volantes et des fumées de silice procèdent à une vitesse relativement lente (Fig. 1. 20).

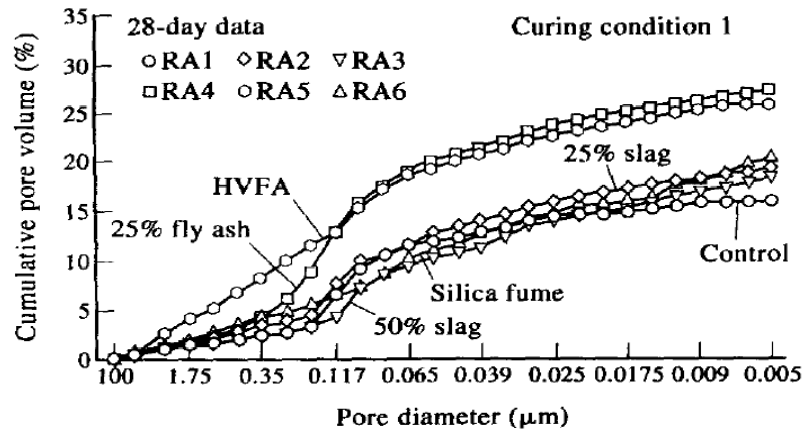


Figure 1.20 : Distribution de la taille des pores du mortier durci dans une cure humide après démoulage [12].

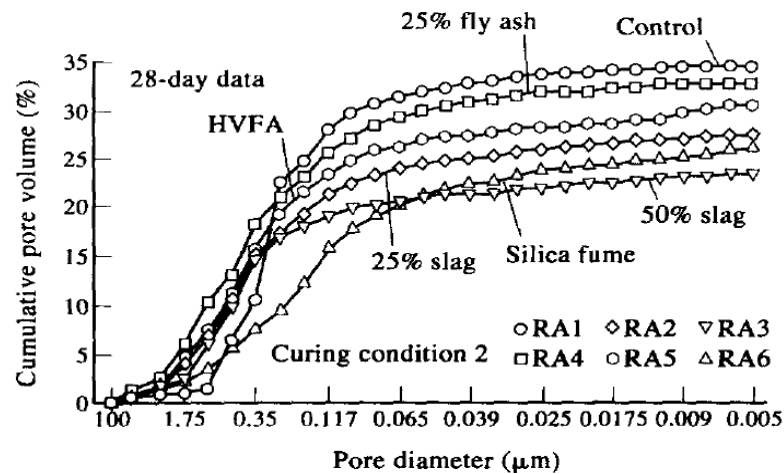


Figure 1. 21 : Distribution de la taille des pores du mortier durci dans une chambre climatique après démoulage [12].

La cure humide initiale pendant 2 jours suivi d'une cure dans la chambre climatique ( $T=38^{\circ}\text{C}$  et  $\text{RH}=65\%$ ) améliore de manière significative les performances du mortier témoin ou les valeurs de porosité se rapprochent de ceux obtenus pour la cure humide (condition 1). Cette condition de cure n'affecte pas d'une manière significative la performance des autres mortiers (Fig. 1. 22).

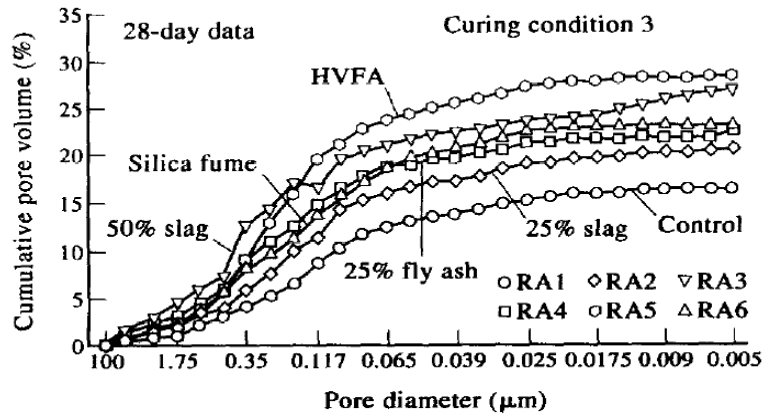


Figure 1.22 : Distribution de la taille des pores du mortier durci dans une chambre climatique après deux jours de cure humide [12].

Le durcissement à 38 °C et 65% d'humidité relative influe favorablement sur la porosité et la distribution de la taille des pores des mortiers. Cependant, cette cure affecte la porosité des mortiers de la fumée de silice avec une valeur de porosité totale d'environ 27% contrairement à la résistance qui a montré des valeurs très élevées par rapport aux autres bétons (Fig. 1. 23).

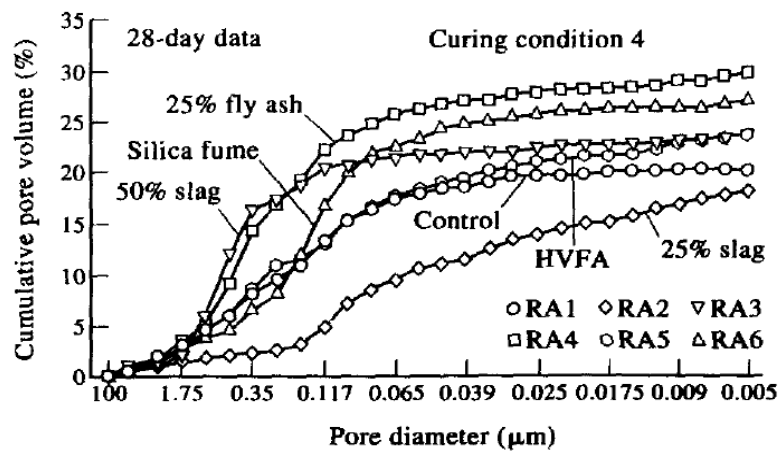


Figure 1. 23 : Distribution de la taille des pores du mortier durci à 38°C et 65% HR [12].

Al-Khaja [28] rapporte qu'une augmentation significative de la pénétration des chlorures dans le béton n'a été observée que lorsque la température de l'exposition a été augmentée de 20 à 45 °C, en particulier à des faibles profondeurs. Toutefois, à des profondeurs supérieures à 45 mm, l'augmentation de la température a un effet négligeable. L'effet de la température sur la pénétration des chlorures est plus prononcé dans le béton ordinaire que dans le béton à haute résistance. L'augmentation de la diffusion des chlorures dus à la température élevée peut être considéré comme un facteur important affectant la durabilité

du béton, vis-à-vis de la corrosion des armatures. L'auteur a réalisé des essais d'immersion sur deux types de bétons, un ciment portland ordinaire OPC (C3A : 10 %, C4AF : 10,1 %) et un ciment Portland à Haute Résistance aux Sulfates SRPC (C3A : 2,8 %, C4AF : 12,2 %). Les rapports E/C sont de 0,39 (béton à haute résistance) et de 0,48 (béton ordinaire). Les bétons ont été conservés à température ambiante pendant 28 jours, ensuite ils ont été maintenus dans une solution de chlorure de sodium à 5 % en masse aux températures 20 et 45 °C pendant 180 jours. L'auteur a constaté que pour tous les rapports E/C, l'augmentation de la température d'essai accélère la pénétration des chlorures dans le béton (Fig. 1. 24).

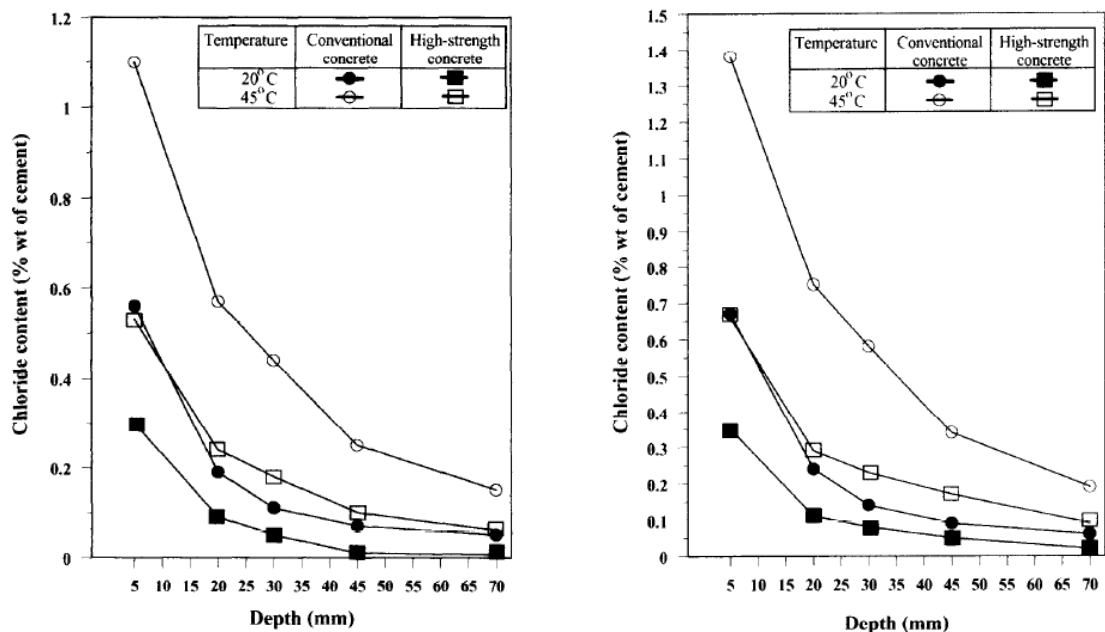


Figure 1. 24 : Influence de la température d'exposition sur la pénétration des chlorures dans le béton [28].

Bastidas-Arteaga et al. [29] ont expliqué l'augmentation initiale de la corrosion pour les structures proches de la mer par le fait que des structures placées dans un environnement marin tropical sont exposées tous les temps à des chlorures, à des températures et humidité élevées ce qui accélère la pénétration des ions du chlore dans béton. Cet effet est plus sensible à l'environnement tropical parce que les grandes valeurs de température et d'humidité réduisent le temps de corrosion initial.

Jooss and Reinhardt [30] ont montré qu'il y a une variation considérable de la diffusion des ions du chlore selon les types de béton et le type de cure (Figs. 1.25 & 1.26).. La diffusion

augmente de 10 à 21% pour une augmentation de température de 20 à 50° C et 8 à 21% pour 50 à 80° C.

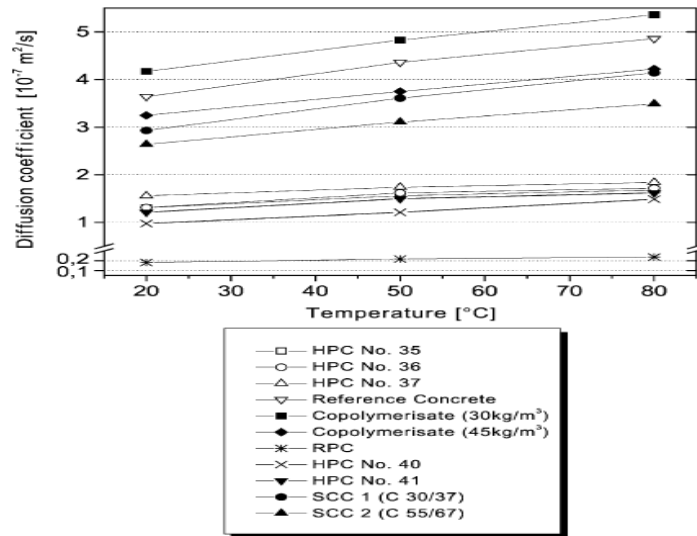


Figure1.25 : Coefficient de diffusion en fonction de la température (cure humide) [30].

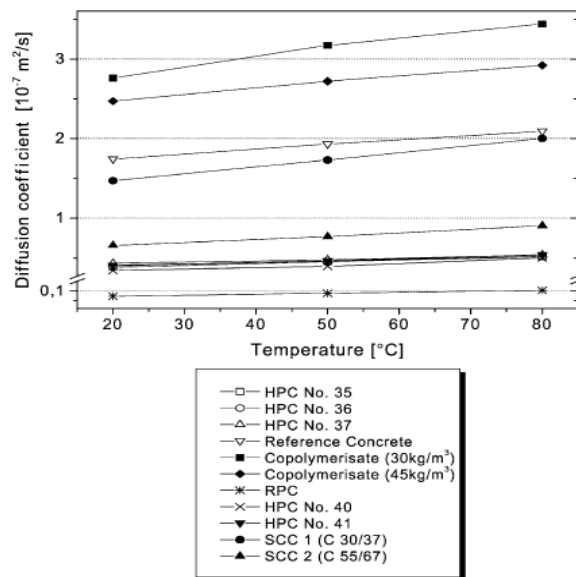


Figure1.26 : Coefficient de diffusion en fonction de la température (l'air libre) [30].

Page et al. [31] ont analysé l'influence de la température sur la diffusion de chlorures dans les pâtes de ciments Portland pour plusieurs rapports E/C. Les pâtes sont conservées dans une solution de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  à 22  $^{\circ}\text{C}$  pendant 2 mois, puis dans des solutions à différentes températures. Le coefficient de diffusion effectif augmente avec la température d'essai (Tableau 1. 1).

Tableau 1.1 : Influence de la température sur le coefficient de diffusion effectif des chlorures [31].

Température	$D_{eff} \times 10^{13} \text{ m}^2/\text{s}^{-1}$		
	E/C=0.4	E/C=0.5	E/C=0.6
7 °C	11,03	20,7	51,9
14.5°C	12,7	23,6	84,6
25°C	26,0	44,7	123,5
35°C	44,7	94,8	165,2
44°C	84	183,6	318,2

### b. Absorption capillaire

Kockal et Turker [32] ont montré que les coefficients de capillarité sont très élevés pour les bétons conservés dans un environnement naturel pour tous les taux de substitution en laitier et cendres volantes (20, 40 et 60%) (Figs. 1.27 à 1.29).

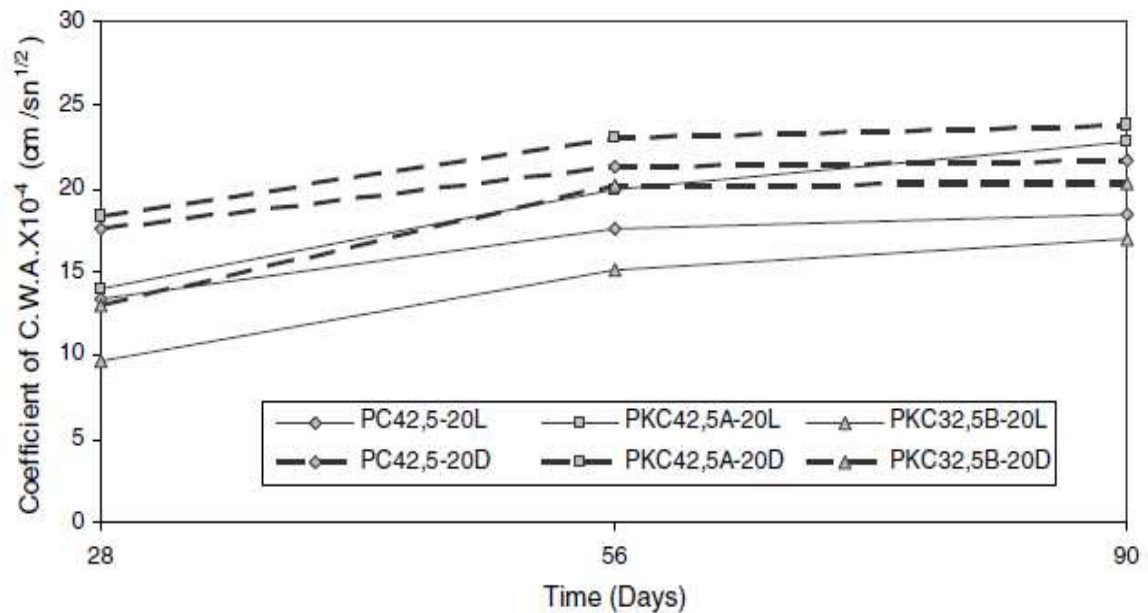


Figure 1. 27 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité pour 20% de substitution [32].

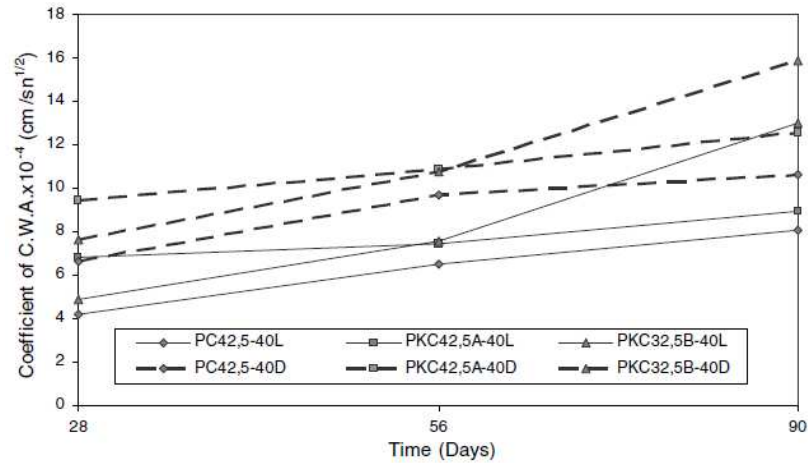


Figure 1. 28 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité pour 40% de substitution [32].

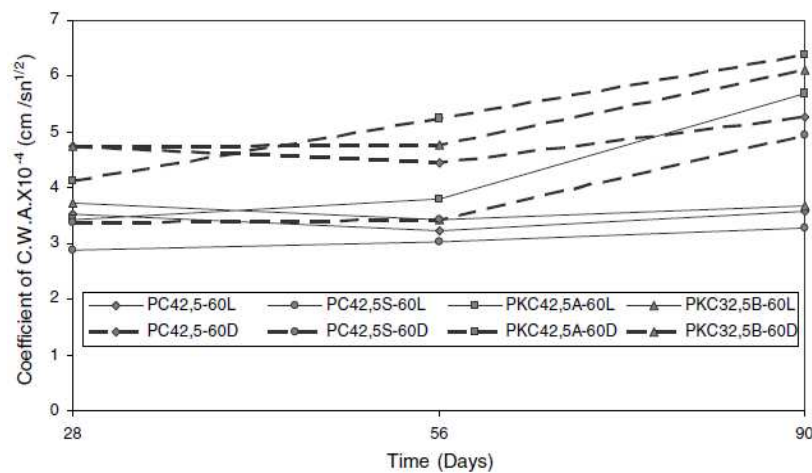


Figure 1. 29 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité pour 20% de substitution [32].

Tasdemir [33] a étudié les effets combinés des additions et des conditions de cure sur la sorptivité et la résistance à la compression du béton de CEMII 42.5. Il a évalué le coefficient de sportivité pour des bétons contenant des ciments avec les cendres volantes (FA), la poudre de grés (PS), la poudre de calcaire (LP) et la fumée de silice (SF). Il a aussi étudié le coefficient de sorptivité et la résistance à la compression des bétons avec CEMII 32.5. Il a prouvé que les additions minérales sont bénéfiques pour l'augmentation de la résistance et la réduction de l'absorption capillaire.

### c. Perméabilité à l'eau

Al-Khaiat et Haque [34] ont montré que la profondeur de pénétration de l'eau, est beaucoup plus sensible à la mesure de cure initiale de SLWC (Structural lightweight concrete). Alors que la résistance à la compression des éprouvettes exposées à des conditions ambiantes au bord de la mer était plus élevée que celles conservées dans l'eau.



Leur pénétration à l'eau a presque doublée lorsque la cure initiale était de 1 jour. Ces résultats indiquent l'importance de la cure initiale des structures côtières.

Tableau 1.2 la résistance et les caractéristiques physiques de SLWC [34]

Penetration d'eau (mm) 200 x 200x 120	La cure dans l'eau	Roof Top			La résistance à 28 jours au bord de la mer		
		1 jour	3 jours	7 jours	1 jour	3 jours	7 jours
	28 jours	28 jours	28 jours	28 jours	28 jours	1 jour	3 jours
	19,6	36	29,1	26,8	38,2	32	28,6

Jooss et Reinhardt [30] ont observé que la perméabilité augmente de 13 à 62% lorsque la température est augmentée de 20 à 50° C et 3 à 55% pour une augmentation de 80° C (Fig. 1.30).

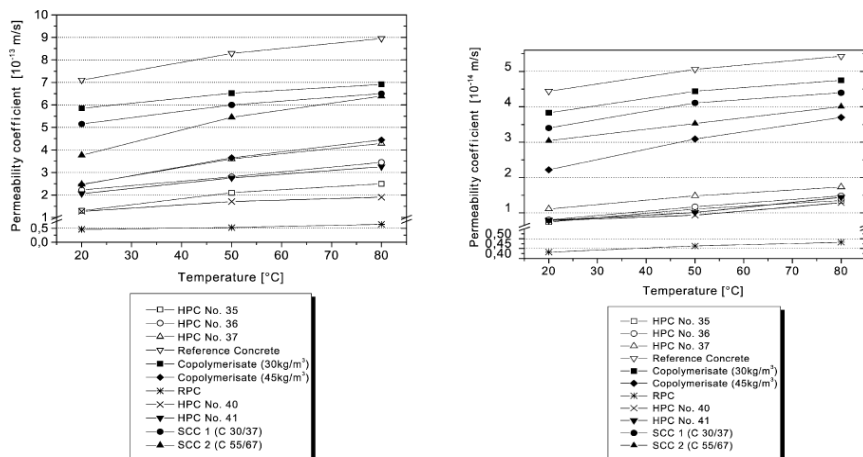


Figure 1.30 : Coefficient de perméabilité en fonction de la température, pendant 1 h et 48 h [30].

Berhane [57] a trouvé qu'au-dessus d'une certaine limite, un taux élevé d'évaporation diminuera la maniabilité et peut entraîner une fissuration par retrait plastique, qui à son tour engendrera des effets négatifs sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

#### d. Effet du laitier sur la durabilité

La composition des laitiers de haut fourneau et leur structure vitreuse varie en fonction des procédés de fabrication et de la méthode de refroidissement (un mélange de chaux, de silice et d'alumine) [36]. La composition chimique moyenne d'un laitier type est donnée dans le tableau 1.3. Les laitiers doivent être constitués au minimum de deux tiers en masse de la somme de (CaO, MgO et SiO<sub>2</sub>). Le restant contient de l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ainsi que de faibles quantités d'autres composants. Le rapport massique entre la somme (CaO + MgO) et SiO<sub>2</sub> doit être supérieur à 1 [38].

Tableau 1.3 : La composition chimique principale moyenne d'un laitier [37].

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
30 à 50 %	27 à 42 %	5 à 33 %	0 à 21 %

La présence de cendres volantes et de laitier réduit la demande en eau de gâchage et améliore la structure poreuse des matériaux, en diminuant la dimension des pores [39].

Galle [40] a conclu que la porosité à l'eau des pâtes de CEM V est plus grande que celle de CEM I mais la taille des pores est plus petite dans les CEM V. Comme pour les pâtes, la dimension des pores est plus petite dans le béton à base de ciment CEM V par rapport à celle du ciment CEM I (Fig. 1.31).

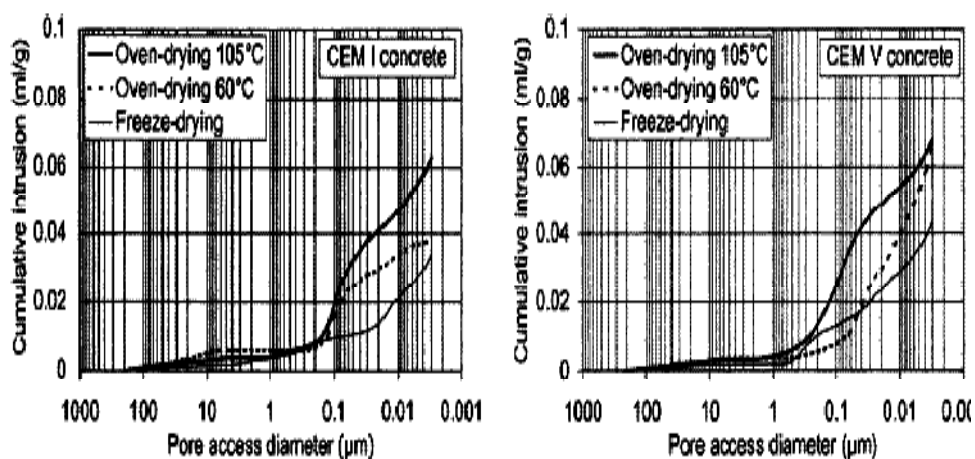


Figure 1.31 : Distribution

de la taille des pores dans le béton (âgé 12 mois, E/C = 0,43) [40].

On constate sur la Figure 1.31 qu'avant 28 jours, la taille des pores ouvertes dans les pâtes de ciment aux cendres volantes ou au laitier est plus élevée que celle du ciment Portland.

Cependant, après 28 jours, la taille des pores diminue plus significativement que celle du ciment CEM I confirmant les résultats trouvés par d'autres chercheurs et montrés sur la figure 1.32.

Bejaoui [42] a également étudié la porosité de pâtes de CEM I et CEM V, à différents rapports E/C. La porosité totale reste plus grande dans le cas des pâtes de CEM V, mais la répartition de taille des pores dans les matériaux à base de ciments CEM V est plus étroite et plus fine.

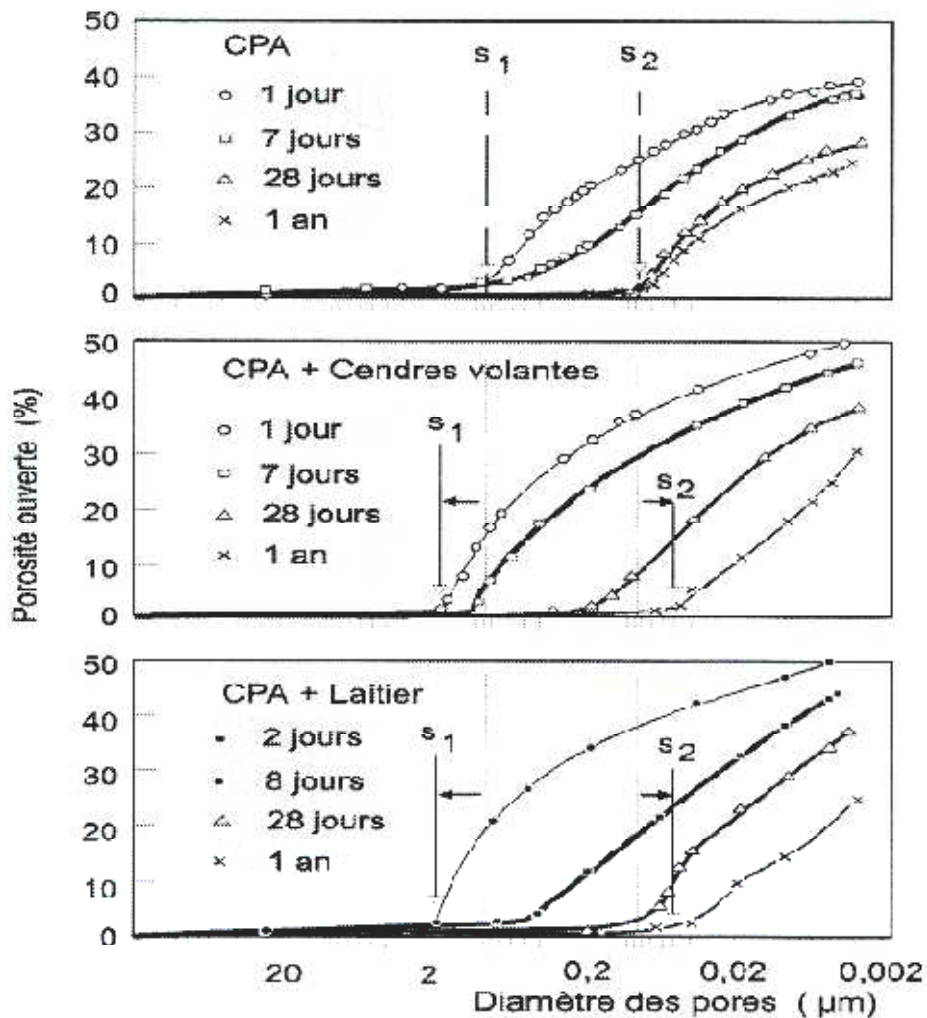


Figure 1.32: Influence des cendres volantes et du laitier sur l'évolution de la structure poreuse des pâtes de ciment au cours du temps [41].

### 1.6 Influence du climat chaud sur les performances du béton autoplaçant

Cette partie présente des généralités sur les Bétons Autoplaçants (BAP). Dans un premiers temps on donne une synthèse sur la caractérisation rhéologique à l'état frais, et mécanique à l'état durci, puis on expose l'effet du climat chaud sur les BAP.

### **1.6.1 Définition et avantages**

Le béton autoplaçant BAP est un béton très fluide, homogène, qui se met en place sous le seul effet de la gravité et son énergie de compactage supplémentaire, il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une nappe d'armatures dense ou en présence d'autres obstacles, tout ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport ; du pompage et de la mise en œuvre.

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire:

#### Avantages techniques :

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé).
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.
- Meilleur enrobage des armatures.
- Réalisation de formes complexes et/ou de grande hauteur fluidité obtenue sans excès d'eau garantissant l'homogénéité du béton et l'obtention de résistances.
- Bonne qualité de remplissage (même en cas d'accès difficile).
- Bonne qualité de parement sous réserve de précautions de mise en œuvre.
- Suppression de la vibration : amélioration des conditions de travail des compagnons (santé et sécurité).
- Respect des riverains en chantier urbain (nuisances sonores réduites).

#### Avantages socio-économiques :

- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Absence des systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.
- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage.
- Réduction des risques d'accident.

Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton Autoplaçant :

- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales.
- Compatibilité des matériaux.
- Etanchéité des coffrages.

Les premiers BAP ont été confectionnés avec des ajouts fluidifiants réduisant ainsi le rapport eau sur ciment (E/C) du béton. Les plastifiants ou les superplastifiants confèrent au béton une grande fluidité, puisqu'ils s'adsorbent à la surface des particules de ciment et agissent par effets stérique et électrostatique pour disperser ces particules. Cette fonction diminue d'une part le phénomène de floculation du ciment au contact de l'eau, et augmente d'autre part la proportion d'eau libre dans la suspension [43].

Les différentes approches visant à concevoir des bétons Autoplaçants ont abouti à des formulations de bétons ayant un volume de pâte plus important que celui des bétons ordinaires (pour des résistances mécaniques égales). En effet, la présence de la pâte (mélange du ciment, des adjuvants, de l'eau efficace et des additions minérales) remplit les vides et écarte les granulats, minimisant ainsi les frictions et les frottements. Ceci a pour conséquence d'améliorer l'ouvrabilité et l'écoulement du béton. Les BAP contiennent donc une quantité moins importante de gravier, et beaucoup plus de fines particules (inférieures à 80 microns). Les additions minérales de type filler calcaire, cendre volante, fumée de silice, laitier,.... etc, ont gardé leur rôle comme substituant partiel du ciment dans les BAP.

La réalisation d'un BAP est devenue de ce fait une opération plus complexe que celle d'un béton ordinaire traditionnel. En effet, il s'agit de combiner un nombre plus élevé de matériaux, opération accompagnée d'éventuels problèmes de compatibilités entre matériaux (ciment - adjuvants, adjuvant – adjuvant).

### 1.6.2 Formulation des BAP

Il existe de très grande variété de matériaux dans le monde, et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant. Chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre

formulation. La variété de matériaux peut conduire aussi à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, résistance). Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr ; sur la méthode de formulation choisie et des performances souhaitées.

Pour l'optimisation de la formulation des BAP, plusieurs approches ont été conçues à savoir : l'approche japonaise d'Okamura (1999), l'approche française LCPC, l'approche suédoise du CBI par Petersson et al. [44] qui est basée sur le plan d'expérience et celle de d'OH et al. [45] qui repose sur la théorie de l'excès de pâte [56]. Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement varier d'une approche à l'autre. La formulation des BAP repose sur trois critères.

- Fluidification de la pâte : elle est obtenue sans ajout d'eau par utilisation de superplastifiants à fort pouvoir défloculant.
- Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement : la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible ; le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mis en œuvre par vibration.
- Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation: elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additions (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumées de silice) [50].

### 1.6.3 Propriétés des bétons autoplaçant à l'état frais

Les BAP sont caractérisés principalement par leurs propriétés à l'état frais et par conséquent, la caractérisation et le contrôle des propriétés à l'état frais sont essentiels pour assurer les performances souhaitées des BAP. Des recommandations de caractérisation ont été préconisées par l'AFGC, et qui servent actuellement de références normalisées. Les résultats de ces essais permettent de valider la formulation d'un BAP.

L'ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques principales :

- Mobilité en milieu non confiné (d'écrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams)
- Mobilité en milieu confiné (d'écrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L)
- Stabilité (résistance à la ségrégation d'écrite par l'essai de stabilité au tamis) [47].

#### 1.6.3.1 Essai d'étalement (Slump Flow)

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné. C'est une variante de l'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtes perpendiculaires [46].

Les valeurs d'étalement au cône d'Abrams acceptables pour un BAP sont généralement fixées dans la fourchette de 600 à 750 mm (pas de ségrégation visible en fin d'essai c'est-à-dire pas d'amoncellement de gros granulats ni d'auréole de laitance) [47].

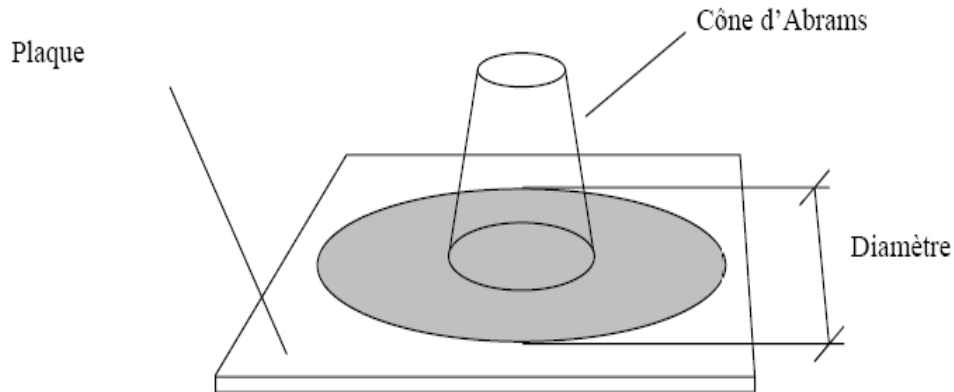


Figure 1.33 : Essai d'étalement au cône (slump Flow) [48].

#### 1.6.3.2 Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures. Le schéma de la boîte ainsi que le principe de l'essai sont décrits sur la figure 1.34. La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute. On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage. Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage  $H_2/H_1$ . Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0.8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation [47].

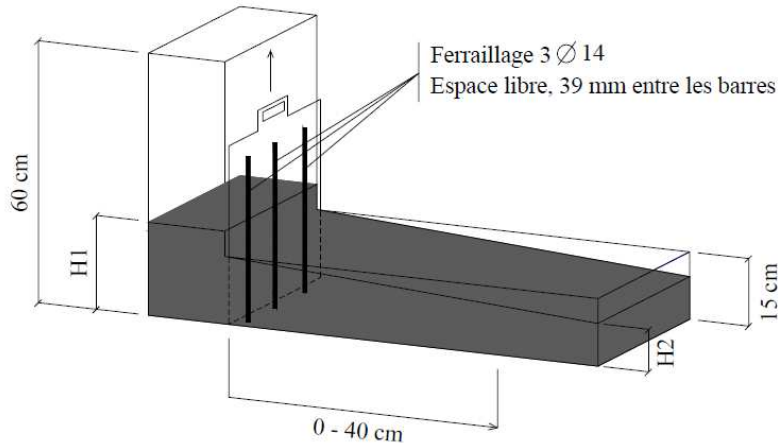


Figure 1.34 : Essai de la boîte en L [48].

### 1.3.3.3 Essai de V funnel

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant, il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en dimensions différentes, et il est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe (Figure 1.35). Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante [48].

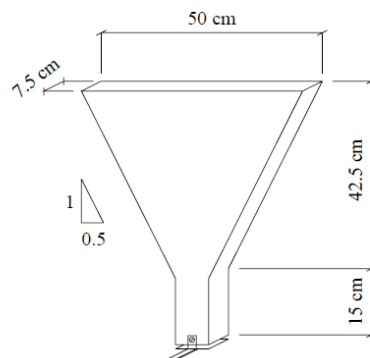


Figure 1.35 : Schématisation de l'Essai de l'entonnoir (V funnel) [48].

### 1.6.3.4 Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à quantifier le risque de ségrégation des BAP. Il permet de compléter l'essai de la boîte en L. On prélève un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de 4.8 kg de béton et on



relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance. On calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P_i = \frac{\text{masse de laitance}}{\text{masse de l'échantillon}}$$

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

- 0% < % Laitance < 15 %) Stabilité satisfaisante
- 15% < % Laitance < 30 %) Stabilité critique
- % Laitance > 30%) Stabilité très mauvaise [47].

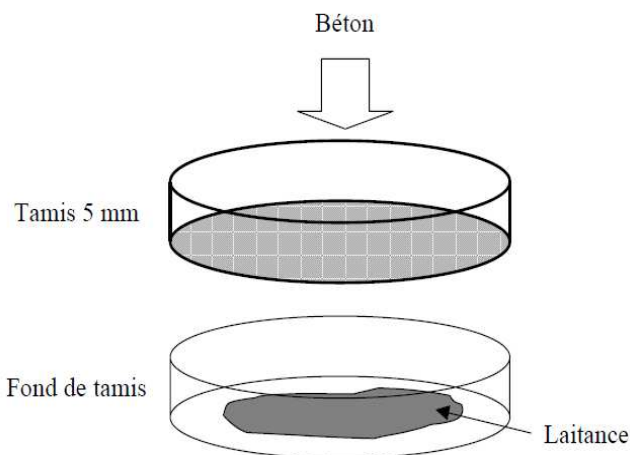


Figure 1. 36: Schématisation de l'essai de stabilité au tamis [48].

#### 1.6.4 Influence du climat chaud sur les performances des BAP

##### 1.6.4.1 Etat frais

Nader et Hamidou [51] ont montré que la performance du béton autoplaçant à l'état frais est affectée par les températures chaudes et froides. À des températures élevées, l'influence s'est manifestée sous la forme d'importante diminution de l'ouvrabilité en milieu ouvert, augmentation importante du débit ou de la viscosité plastique par inférence, et l'amélioration de la stabilité dynamique des BAP frais.

La température froide a affecté la performance des BAP frais par un gain marginal de la capacité d'écoulement, petite variation de la vitesse d'écoulement et une augmentation de la résistance à la ségrégation.

Le changement des propriétés du béton frais est dû à l'élévation ou la diminution de la température qui peut être caractérisé par la quantité d'adsorption de mélange par la surface spécifique de la pâte du béton (Ads /SSAP), l'évolution de la teneur en humidité de

l'agrégat et l'évaporation partielle de l'eau du mélange dans le cas d'élévation de la température [51]. L'influence de la température sur l'étalement est donnée par la figure 1.37.

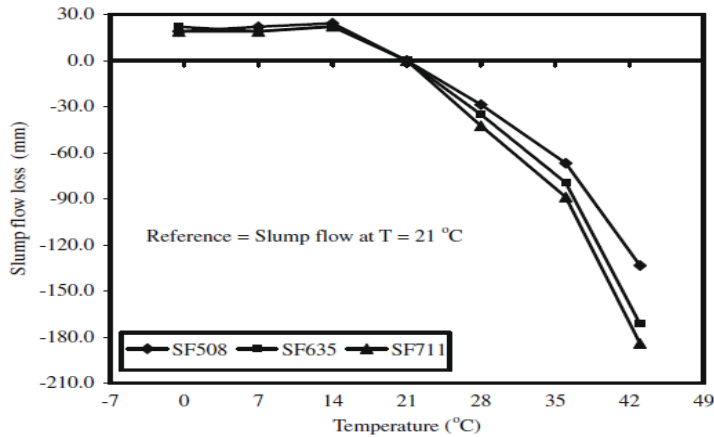


Figure 1.37 : Influence des températures chaudes et froides sur étalement des BAP [51].

#### 1.6.4.2 Etat durci

##### a. Résistance à la compression

Mohamed [52] a analysé l'effet de cure dans l'eau (7 et 28 jours) et à l'air sur la résistance à la compression du béton autoplaçant dosé à 450 et 550 kg/m<sup>3</sup> pour les mélanges à base de cendres volantes, laitier, et soit un ciment type I soit un ciment type II (Figs. 1.38 à 1.41). Elle a observé que le BAP avec 10% de cendres volantes et 10% de fumée de silice comme substituant a donné la plus grande valeur de résistance du béton à la compression. La plus grande valeur de résistance à la compression pour tous les cas de test est obtenue à partir des éprouvettes durcis dans l'eau pendant 28 jours et la valeur la plus faible est obtenue pour les échantillons qui ont été conservé à l'air libre [52]. Les BAP avec 15% de fumée de silice donne des valeurs plus élevées de résistance à la compression que ceux contenant 30% de cendre volantes. Les éprouvettes durcis dans l'eau pendant 28 jours donnent les plus grandes valeurs de résistance à la compression.

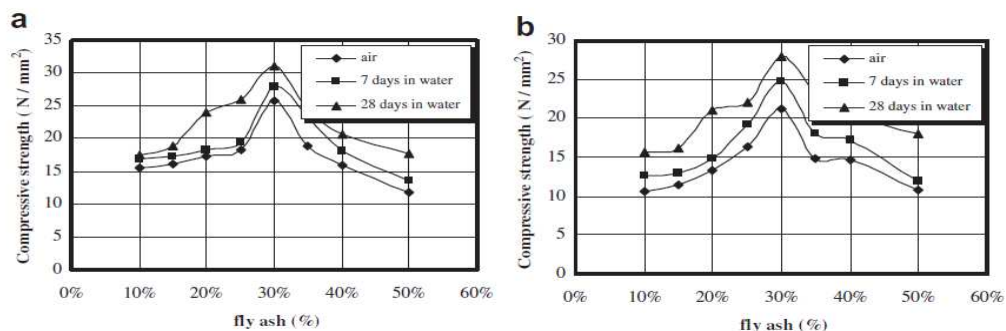


Figure 1.38 : Résistance à la compression de type I: (a) dosage en ciment =  $550 \text{ kg/m}^3$ ; (b) dosage en ciment =  $450 \text{ kg/m}^3$  [52].

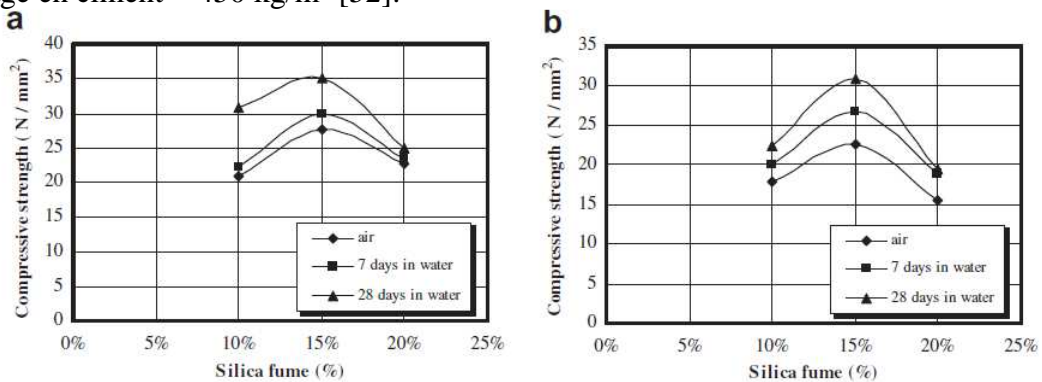


Figure 1.39 : Résistance à la compression de type II: (a) le dosage en ciment =  $550 \text{ kg/m}^3$ ; (b) dosage en ciment =  $450 \text{ kg/m}^3$  [52].

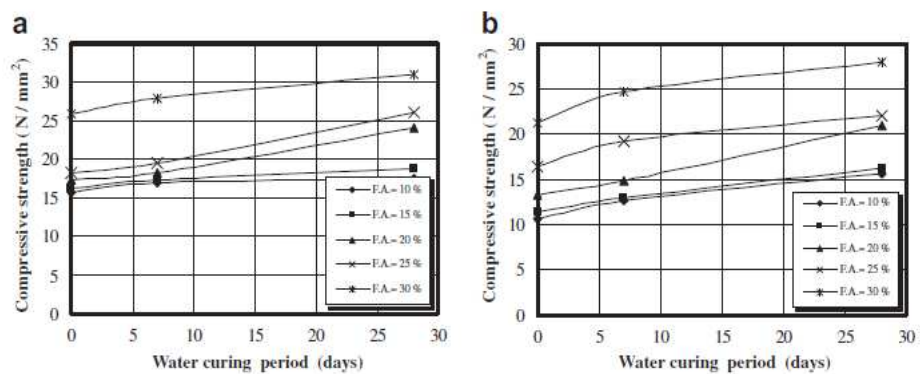


Figure 1.40 : Effet de condition de cure sur la résistance à la compression pour le type I : (a) le dosage en ciment =  $550 \text{ kg/m}^3$ ; (b) dosage en ciment =  $450 \text{ kg/m}^3$  [52].

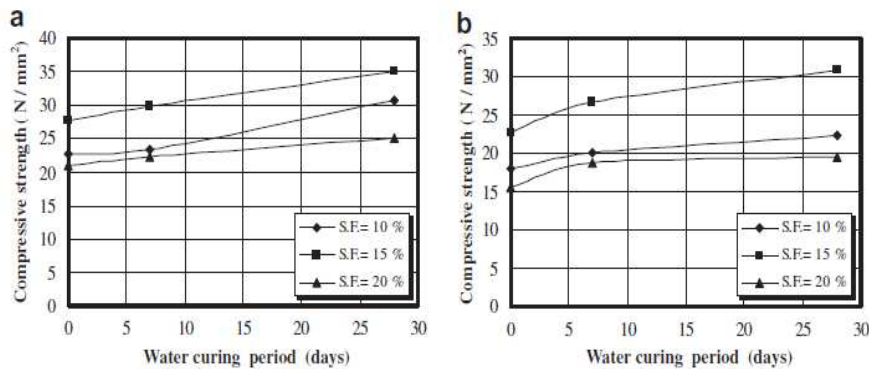


Figure 1.41 : Effet de condition de cure sur la résistance à la compression pour le type II : (a) le dosage en ciment =  $550 \text{ kg/m}^3$ ; (b) dosage en ciment =  $450 \text{ kg/m}^3$  [52].

Ibrahim et Abdulhamit [53] ont montré que la résistance à la compression de tous les bétons conservés dans l'eau est plus grande que ceux du béton conservés dans les autres conditions (Fig. 1.42).

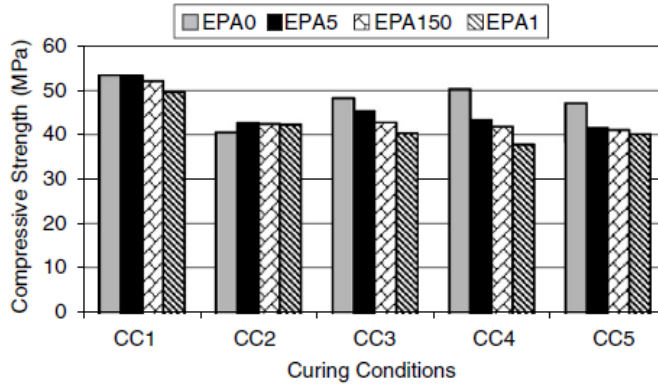


Figure 1.42: Résistance à la compression des éprouvettes de béton selon le pourcentage d'EPA et les conditions de cure [53].

D'après Hui Zhao et al. [54], le développement des résistances à la compression des BAP après une période initiale de cure varie de 33,8 MPa à 36,4 MPa ; 50,2 MPa à 52,6 MPa et de 57,9 MPa à 63,3 MPa pour une période de cure de 3, 7 et 28 jours respectivement (Fig. 1.43).

Les BAP avec une durée de cure de 7 jours et dans des conditions de cure FR( $T=28^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}=85\%$ ) a un taux de gain de résistance à la compression très élevé.

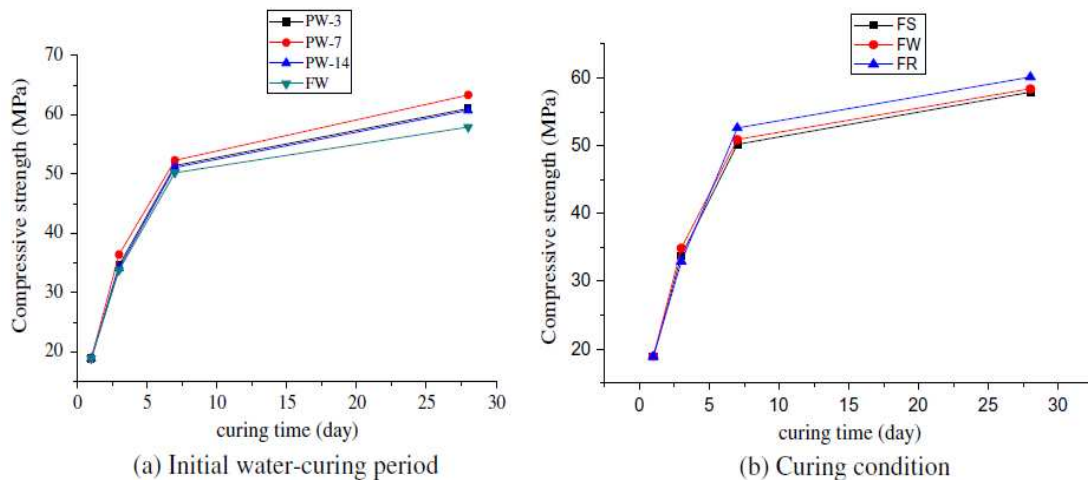


Figure 1.43 : Développement de la résistance à la compression des BAP dont la cure initiale dans l'eau et dans des différentes conditions de cure [54].

Selon Kazim T et al. [55], les résistances à la compression et à la traction des bétons autoplaçants avec ( $E/C=0,38$ ) étaient plus élevés que ceux du béton ordinaire avec ( $E/C=0,58$ ) pour tous les âges de test et pour toutes les conditions de cure (Figure 1.44).

Les BAP contenant de la fumée de silice comme substituant au ciment a donné des valeurs plus élevées de résistance à la compression par rapport aux bétons contenant les cendres volantes. Pour tous les bétons, les échantillons conservés dans l'eau ont les plus grandes

valeurs de résistance à la compression suivies par les échantillons qui sont durcis sous d'autres conditions.

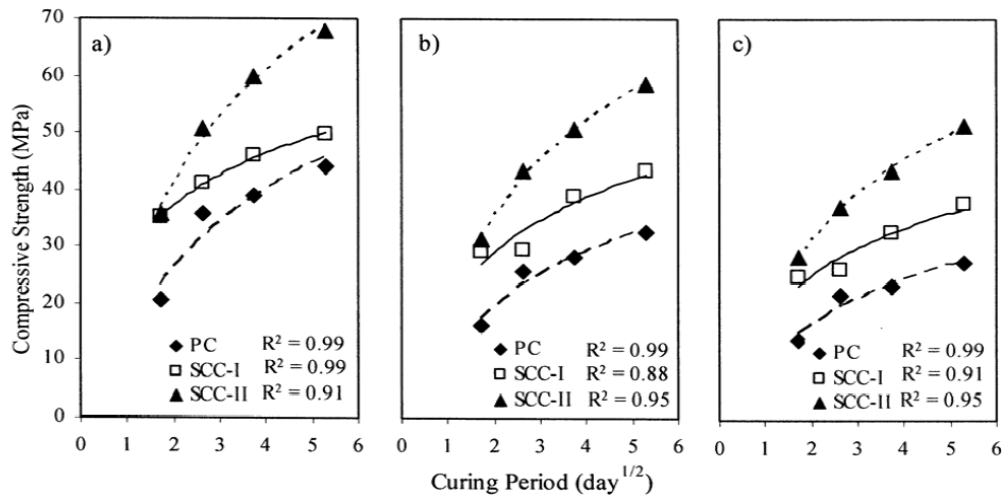


Figure 1.44 : Résistance à la compression du béton ordinaire et BAP pour les différentes méthodes de cure (a) eau, (b) couvert et (c) air [55]

### b. Carbonatation

D'après Hui Z et al. [54], les profondeurs de carbonatation de BAP augmentent de 3 jours à 28 jours d'âge. Une faible profondeur de carbonatation a été observée à 3, 7, 14 et 28 jours de 0 mm ; 0,6 mm ; 1,4 mm et 2,9 mm respectivement (Fig. 1.45).

Le BAP dans des conditions de cure FR(T=28°C et HR=85%) a une profondeur de carbonatation inférieure à celui de l'environnement FS(T=20°C et HR= 95%) et l'environnement FW(T=20°C et HR=100) [54].

La résistance à la compression à 28 jours et la profondeur de carbonatation à 28 jours du BAP dans des différentes conditions de cure ont une grande corrélation (Fig. 1.46).

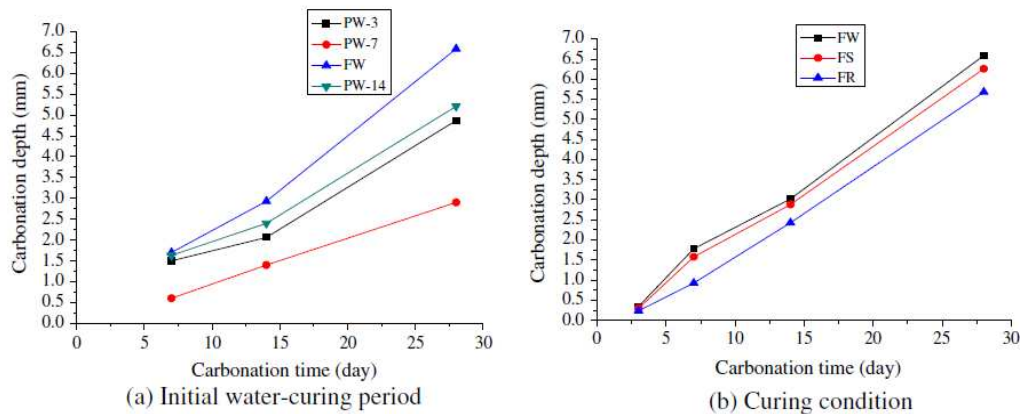


Figure 1.45 : Profondeur de carbonatation dans des différentes initiale et conditions de cure [54].

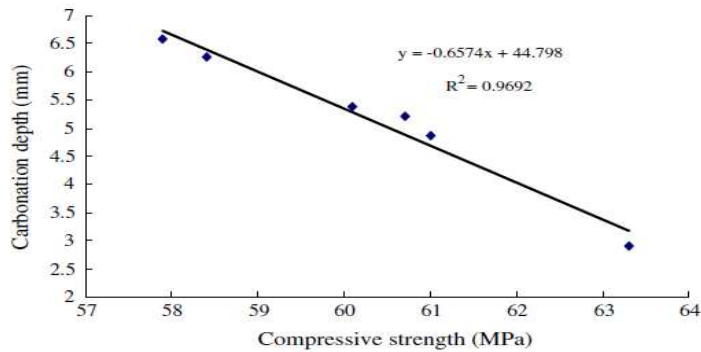


Figure 1.46 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et profondeur de carbonatation des BAP sous différentes conditions de cure [54].

### c. Diffusion des ions du chlorure

Le coefficient de diffusion des ions chlorure BAP avec durcissement en eau pendant une période initiale de cure de 3, 7 et 14 jours sont respectivement de  $.208 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $2.077 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $4.276 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Le BAP soumis à une durée de cure de 7 jours présente le plus faible coefficient de diffusion des ions chlorure (Figure 1.47).

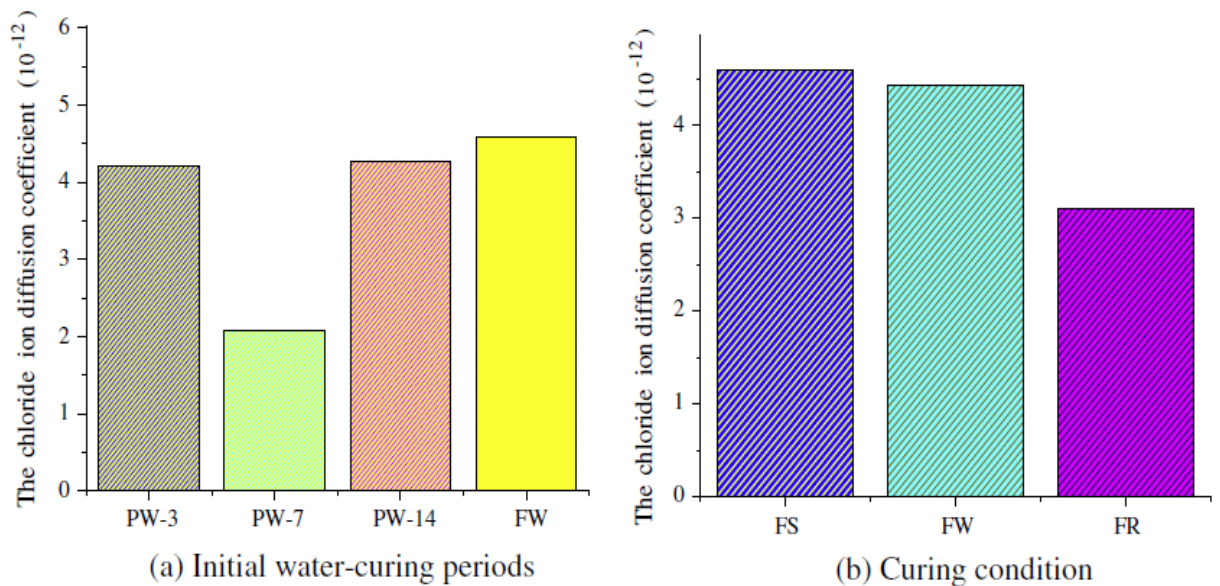


Figure 1.47 : Diffusion des ions du chlorure des BAP après une cure initiale et dans différentes conditions de cure [54].

### d. Absorption capillaire

Ibrahim et Abdulhamit [53] ont montré que le changement des valeurs des coefficients de capillarité dépend de la durée et des conditions de cure ainsi que le pourcentage de granulats légers expansé (expanded perlite aggregate EPA) (Tableau 1.4).

Tableau 1. 4: Coefficient de capillarité selon les conditions de cure [53].

Condition de cure	Substitution %	Durée de cure (jours)				
		28jx10 <sup>-6</sup>	56jx10 <sup>-6</sup>	90jx10 <sup>-6</sup>	120jx10 <sup>-6</sup>	150jx10 <sup>-6</sup>
CC1 (eau)	EPA0	0.45	0.79	0.65	0.40	0.15
	EPA5	0.51	0.76	0.68	0.63	0.20
	EPA10	0.59	0.87	0.64	0.63	0.20
	EPA15	0.64	1.13	0.72	0.66	0.21
CC2(AIR)	EPA0	8.94	7.11	4.26	2.07	0.52
	EPA5	9.25	7.17	2.46	1.51	0.35
	EPA10	10.13	7.38	2.62	1.80	0.42
	EPA15	11.71	7.38	2.67	1.96	0.54
CC3 (humidité14j)	EPA0	0.85	0.92	0.84	0.63	0.20
	EPA5	0.90	0.97	0.97	0.65	0.20
	EPA10	1.06	1.14	1.33	0.72	0.20
	EPA15	1.27	1.20	1.60	0.80	0.20
CC4 (humidité relative)	EPA0	0.57	0.63	0.90	0.66	0.20
	EPA5	0.66	0.62	1.05	0.68	0.20
	EPA10	0.71	0.82	1.11	0.71	0.20
	EPA15	0.93	0.82	1.44	0.77	0.20
CC5 (100% RH)	EPA0	0.48	0.59	0.72	0.45	0.22
	EPA5	0.55	0.78	0.88	0.79	0.23
	EPA10	0.56	0.82	1.62	1.04	0.31
	EPA15	0.63	1.46	1.74	1.19	0.31

Kazim et al. [55] ont montré qu'une bonne cure et un mélange pouzzolanique (fumée de silice ou cendre volante) comme substituant du ciment améliorent la résistance des bétons vis-à-vis de l'absorption d'eau de manière significative.

Une bonne corrélation a été observée entre la sorptivité et la résistance à la compression. La résistance à la compression des bétons augmente en raison de l'hydratation et la sorptivité diminue en conséquence indiquant une microstructure plus dense (Figure 1.48).

La porosité apparente à l'air libre augmente avec l'augmentation du rapport de granulats légers expansés (EPA) dans différentes conditions pour 28 jours de cure (Figure 1.49).



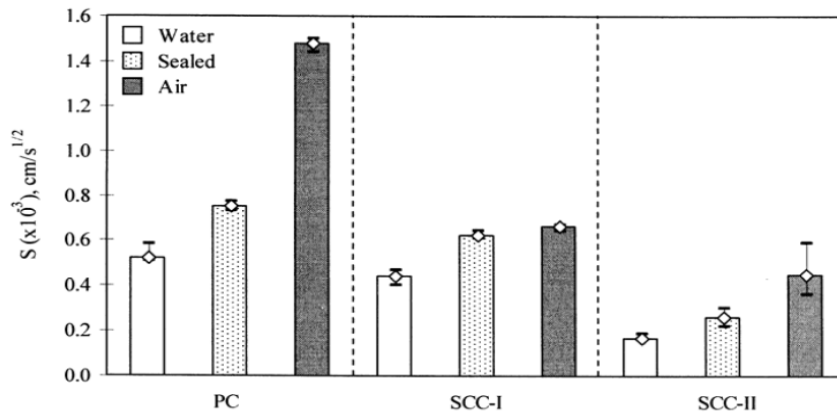


Figure 1.48 : Sorptivité des bétons dans des différentes conditions de cure [55].

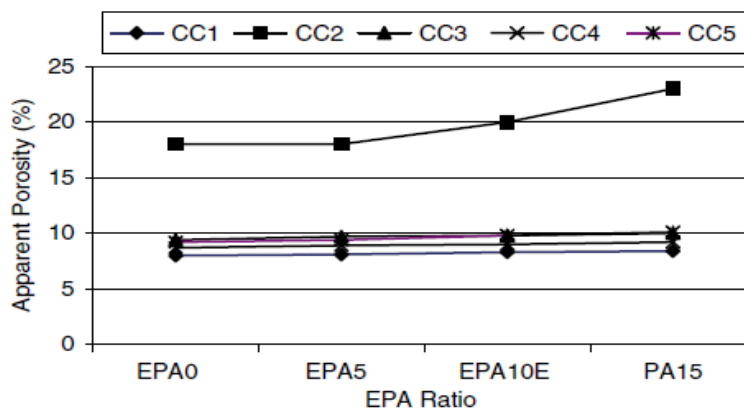


Figure 1.49 : Effets de pourcentage de granulats légers sur la porosité apparente sous des conditions différentes de cure à 28 jours [53].

#### 1.4 Conclusion

L'analyse bibliographique a montré que l'incorporation des additions minérales comme le laitier et les cendres volantes améliorent les propriétés des bétons ordinaires et BAP aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Elles présentent une distribution porosimétrique plus dense, qui conduit à une diminution de la taille des pores et leurs substitutions à des taux optimaux bien étudiés aux ciments contribuent à une amélioration de la durabilité des bétons. Le climat chaud affecte négativement la performance des bétons. L'étude bibliographique a montré que la performance des bétons ordinaires sous climat chaud est bien étudiée. Cependant, la performance des BAP en climat chaud est peu étudiée.







## CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons le programme expérimental. On décrit les matériaux utilisés ainsi que les méthodes d'essais réalisés.

### 2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

#### 2.2.1 Le Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment composé type CEM II/A-L 42.5 fabriqué par la cimenterie de M'sila en Algérie. Sa résistance minimale en compression à 28 jours est de 42,5 MPa. Les caractéristiques physiques et mécaniques de ce ciment sont présentées dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment

$f_{c28}$ (MPa)	$\rho_{abs}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ (kg/m <sup>3</sup> )	SSB (cm <sup>2</sup> /g)	Consistance %	Début de prise (h)	Fin de prise (h)
45.55	3040	1050	3000	28.7	2.50	4.36

#### 2.2.2 Le laitier

Dans cette étude, un laitier granulé de haut fourneau du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Wilaya d'Annaba) a été utilisé comme addition. Ce laitier est obtenu par refroidissement par jet d'eau (trempe à l'eau) et chute dans un grand bassin. Il se présente sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm, de couleur jaune clair (Figure 2.1).



Figure 2.1: Laitier granulé de haut fourneau utilisée : (1) avant broyage, (2) après broyage.

Pour pouvoir l'utiliser comme addition dans les différentes compositions du BAP, nous avons tout d'abord procédé à son étuvage à 50 °C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et ainsi faciliter son broyage. Ensuite, un broyage total a été effectué à l'aide d'un broyeur à boulets (Figure 2.2) d'une capacité de 5 kg (Laboratoire de la chimie industrielle à Blida). Enfin, la quantité finale de laitier obtenue après le broyage a été mélangée dans le but d'assurer une bonne homogénéisation du mélange préparé. Dans notre étude, une seule finesse du laitier de  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$  est utilisée. D'après la courbe de finesse de référence on a broyé le laitier pendant 125 minutes pour avoir cette finesse. La masse volumique apparente du laitier est de  $956 \text{ kg}/\text{m}^3$  et sa masse volumique absolue est  $2850 \text{ kg}/\text{m}^3$ .



Figure 2.2: Broyeur à boulet utilisé.

L'analyse chimique de laitier est donnée dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Composition chimique du laitier d'El Hadjar.

Elément	Si O <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub>	Ca O	Mg O	Mn O	K <sub>2</sub> O	S O <sub>3</sub>	Ti O <sub>2</sub>
%	40,10	6,00	2,00	42,20	4,70	2,60	1,20	0,15	1,20

Les normes européennes définissent des limites sur la composition chimique du laitier de haut fourneau granulé et broyé. La norme française NF P 15-301 [60] exigent, pour la fabrication des ciments composés, que :

- le laitier granulé soit constitué d'au moins deux tiers, en masse, de la somme des oxydes CaO, MgO et SiO<sub>2</sub>.
- Le rapport en masse  $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2)$  dépasse 1,0

Ce rapport assure une alcalinité élevée, qui permet au laitier d'avoir une bonne hydraulité [59]. En effet, l'activité hydraulique du laitier est liée à son alcalinité, qui est définie d'une manière générale par le rapport pondéral de la somme des oxydes basiques à la somme des oxydes acides [58]. Cependant, dans la littérature, l'indice de basicité est défini sous plusieurs formes à savoir :

Selon la valeur de l'indice de basicité, le laitier se divise en deux catégories [58] :

Basique : si l'indice est supérieur à 1,0 ou Acide : si l'indice est inférieur à 1,0.

Les indices de basicité « $M_b$ » indiquent si un laitier est basique ou acide. Les indices les plus utilisés sont les suivants :

$$M_{b1} = \frac{\% \text{Cao} + \% \text{Mgo}}{\% \text{SiO}_2} = 1.17 \quad 2.1$$

$$M_{b2} = \frac{\% \text{Cao}}{\% \text{SiO}_2} = 1.05 \quad 2.2$$

$$M_{b3} = \frac{\% \text{Cao} + \% \text{Mgo}}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3} = 1.01 \quad 2.3$$

Pour notre cas, l'indice de basicité du laitier ( $M_b > 1$ ), Donc le laitier est basique.

Parmi les facteurs qui influent sur le pouvoir hydraulique du laitier granulé sont en général au nombre de trois :

- la composition chimique (elle nécessite des quantités suffisantes en chaux et en alumine),
- le degré de vitrification (dissolution des produits amorphes),
- la surface spécifique (surface de contact eau-laitier).

L'indice hydraulique (taux ou degré de vitrification : la richesse du laitier en éléments silicatés) sert d'indication de l'activité hydraulique du laitier de haut fourneau et le laitier est généralement classé selon cet indice (Tableau 2.3). L'indice d'activité est calculé par la méthode de Keil selon la formule suivante :

$$\alpha = \frac{S_p \times F}{1000} \quad 2.4$$

Avec :

$S_p$  : Surface spécifique de Blaine des fines du laitier,

$F$  : pourcentage des fines du laitier.

Tableau 2.3 : Indice d'Activité hydraulique du laitier granulé [69].

Classe	L'indice hydraulique $\alpha$	Type de laitier
1	$\alpha < 15$	Laitier très pauvre
2	$15 < \alpha < 40$	Laitier pauvre
3	$40 < \alpha < 55$	Laitier acceptable
4	$55 < \alpha < 85$	Laitier bon
5	$85 < \alpha < 100$	Laitier très bon
6	$\alpha > 100$	Laitier excellent

Le laitier granulé d'El-Hadjar a un coefficient  $\alpha$  moyen de 44 (laitier acceptable).

### 2. 2. 3 Le sable

Le sable utilisé est un mélange de deux sables : le premier sable provenant de Baghlia et le deuxième provenant de Boughezoul. Les caractéristiques de ces sables sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.4: Caractéristiques physiques et mécaniques du sable corrigé

Granulat	Sable		
	0/3	0/5	Mélange
Classe granulaire (mm)	0/3	0/5	Mélange
Masse volumique apparente ( $\rho_{app}$ ) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1413	1652	1531
Masse volumique absolue ( $\rho_{abs}$ ) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2542	2560	2584
Coefficient d'absorption (%)	0,56	0,69	0,64
Module de finesse	1,68	3,32	2,8
Composition (%)	42,25	57,75	100
Equivalent de sable visuel (%)	67,63	82,27	77,08
Equivalent de sable au piston (%)	70,65	86,20	80,15

### 2. 2. 4 Le gravier

Deux types de graviers, ont été utilisés pour la confection des bétons étudiés. Ils présentent respectivement une granulométrie 3/8 et 8/15. Les deux gravier provenant de carrière de Setif. Leurs caractéristiques principales sont résumées dans le tableau 2.5 ainsi que les courbes granulométriques du sable et du gravier utilisés sont données dans la figure 2.3.

Tableau 2.5 : Caractéristiques physique de gravier

Granulats	Classe granulaire (mm)	$\rho_{app}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{abs}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficient d'absorption (%)
Gravier	3/8	1492	2715	0,5
	8/15	1482	2700	0,5

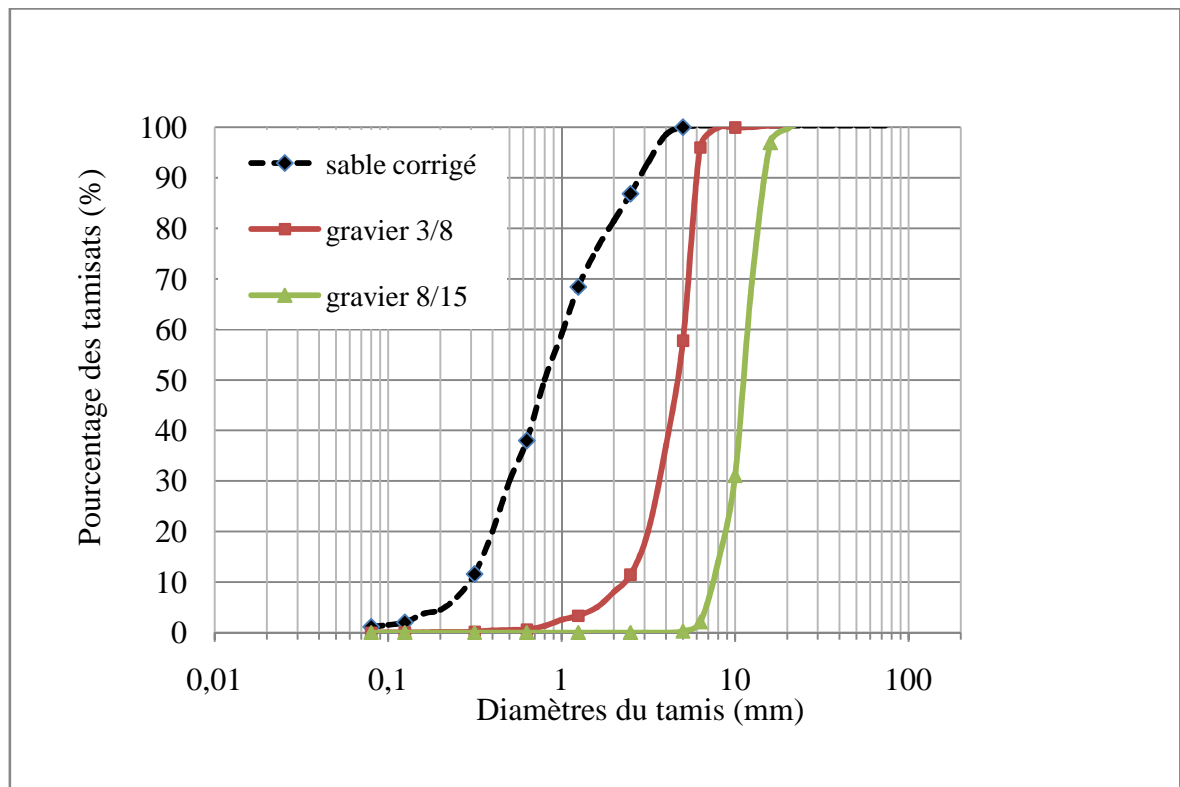


Figure 2.3 : Courbe granulométrique du sable et gravier naturels.

### 2.2.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés [60] qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, corrosion des armatures, etc) [61]. L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes est une eau du robinet, propre et exempte d'impuretés.

### 2.2.6 Les superplastifiants

Le superplastifiant utilisé pour les mélanges de béton est un superplastifiant de la nouvelle génération que sont les polycarboxylates. Les polycarboxylates sont des molécules ayant un double effet pour la dispersion des particules [62].

Dans le cas de cette étude, le superplastifiant choisi, de dénomination commerciale MEDAFLOW 30 de la société Granitex, est un produit adapté pour les applications des BAP. Il se présente sous forme d'un liquide avec une plage de dosage comprise entre 0,5% à 2% en masse de poudre.

### 2.3 Formulations adoptées

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériaux de la gâchée, afin d'obtenir le béton qui aura les propriétés souhaitées. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Liant, qui est fixé dans cette étude à 0.45. Le dosage en superplastifiant a été optimisé par des essais sur mortier afin d'obtenir un mortier autoplaçant homogène et stable (sans ressuage).

#### 2.3.1. Formulation du mortier autoplaçant

La formulation du mortier autoplaçant a pour but d'optimiser le dosage en superplastifiant. Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées d'après l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe A [63]. La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier dont la procédure est comme suit (Fig. 2.4) :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité),
- Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d'eau ( $Eau1 = 70\% \text{ Eau}$ ),
- Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l'eau de gâchage ( $Eau2 = 30\% \text{ Eau}$ ) mélangé avec le superplastifiant,
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.



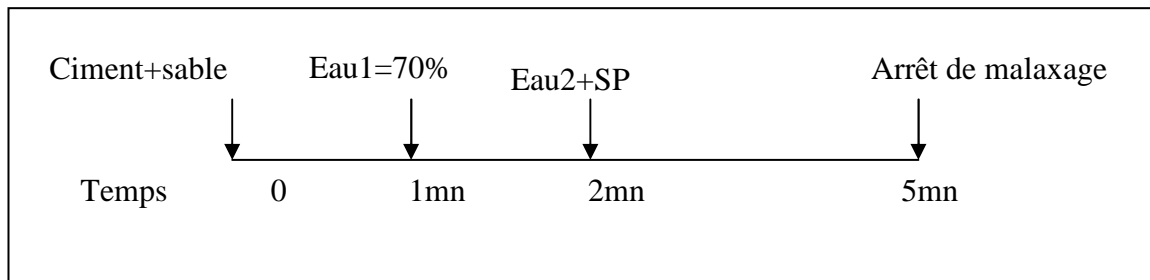


Figure 2. 4: Séquence de malaxage du mortier [63].

### 2.3.2 Essais réalisés sur mortier

#### a. 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 est soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire pour retenir la moyenne. La figure 2.5 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.



Figure 2. 5: Essai d'Etatement pour Mortier.

#### b. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), consiste à remplir l'entonnoir 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 (Figure 2.6).

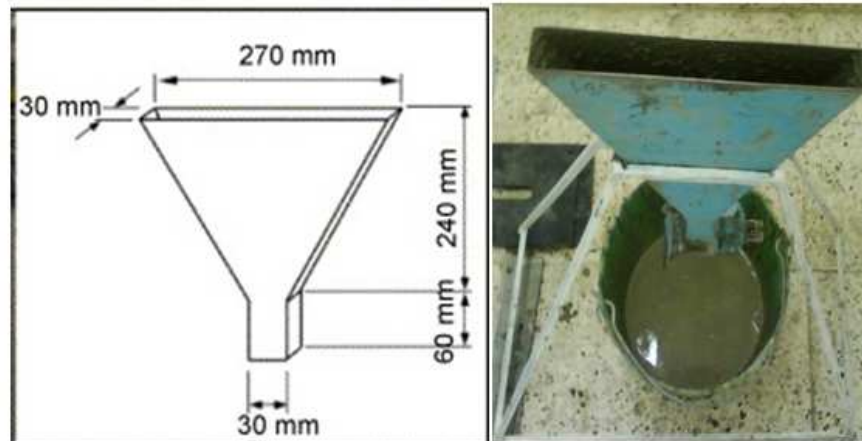


Figure 2.6 : Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier.

Les expériences montrent que lorsque la valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et le temps d'écoulement compris entre 6 et 10s produisent un MAP réussi [66].

### 2.3.3. Essais réalisés sur béton

La fabrication du béton a été basée sur la méthode Japonaise dite la méthode générale et la formulation du béton autoplaçant est déterminée à partir d'un programme Excel Annex B. Trois familles ont été étudiées, à savoir un BAP sans ajouts choisi comme béton de référence et deux BAP l'un avec 15% de laitier et l'autre avec 25% de laitier.

Le BAP a été formulé à partir des mêmes constituants, avec le même squelette granulaire et un rapport E/L constant. Le dosage en superplastifiant a été vérifié à partir des essais sur béton frais.

Une fois le béton est prêt, on procède aux essais d'ouvrabilité dans l'ordre suivant : essai d'étalement au cône d'Abrams, essai de l'entonnoir (V-Funnel), essai de la boîte en L, essai de stabilité au tamis. Par ailleurs la fabrication se déroule comme suit [65]:

- Pré-mouillage du malaxeur pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur,
- Introduction des constituants solides en commençant par les graviers, le sable, puis le ciment et le laitier pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange,
- Malaxage puis introduction de 70% de l'eau pendant 1 minute,
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le reste de l'eau de gâchage (Eau<sub>2</sub> = 30% Eau),
- Malaxer pendant 5 minutes,
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes,
- Remalaxer pendant 30 secondes conformément à la procédure indiquée sur la figure 2.7.

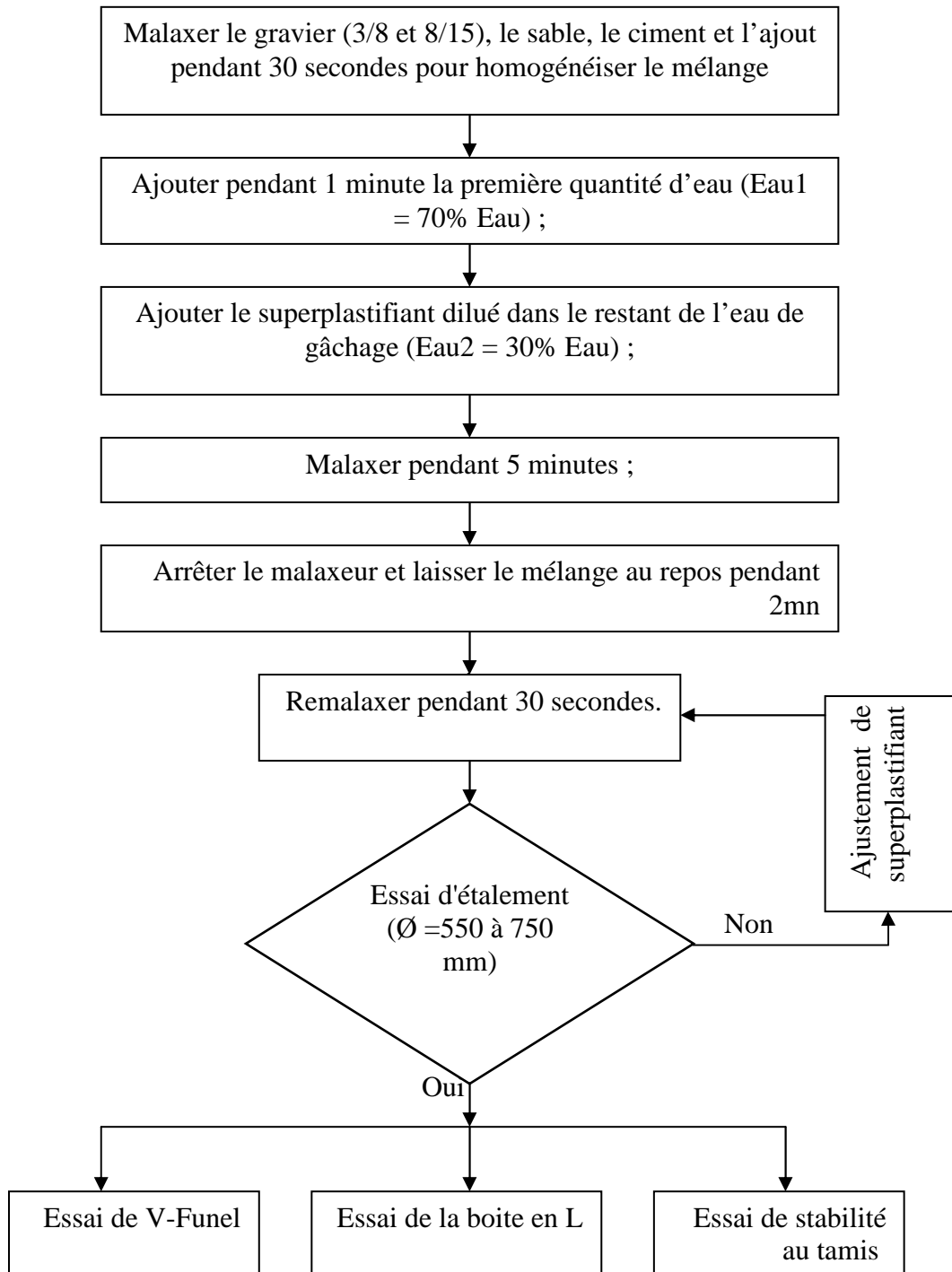


Figure 2. 7: Séquence du malaxage du béton.

### 2.3.3.1 Essai à l'état frais

La qualité du béton à l'état frais a été vérifiée suivant les essais recommandés par l'AFGC [47]. Les essais présentés ci-dessous caractérisent les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais qui ont été réalisés dans le cadre de ce travail.

#### a. Essai d'étalement (Slump flow test)

L'essai d'étalement consiste à mesurer l'étalement au cône d'Abrams. On remplit un échantillon de béton dans un cône d'Abrams maintenu sur une plaque en acier horizontale et humidifiée (Figure 2.8). Ensuite on lève d'un geste régulier et vertical le cône et on laisse s'écouler le béton. Le premier résultat de cet essai est exprimé par la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton obtenue. Il nous renseigne sur la déformabilité du béton.

Cet essai est complété par la mesure du temps mis par l'étalement pour atteindre un diamètre de 50 cm, et qui nous renseigne sur la vitesse de mobilité du béton.

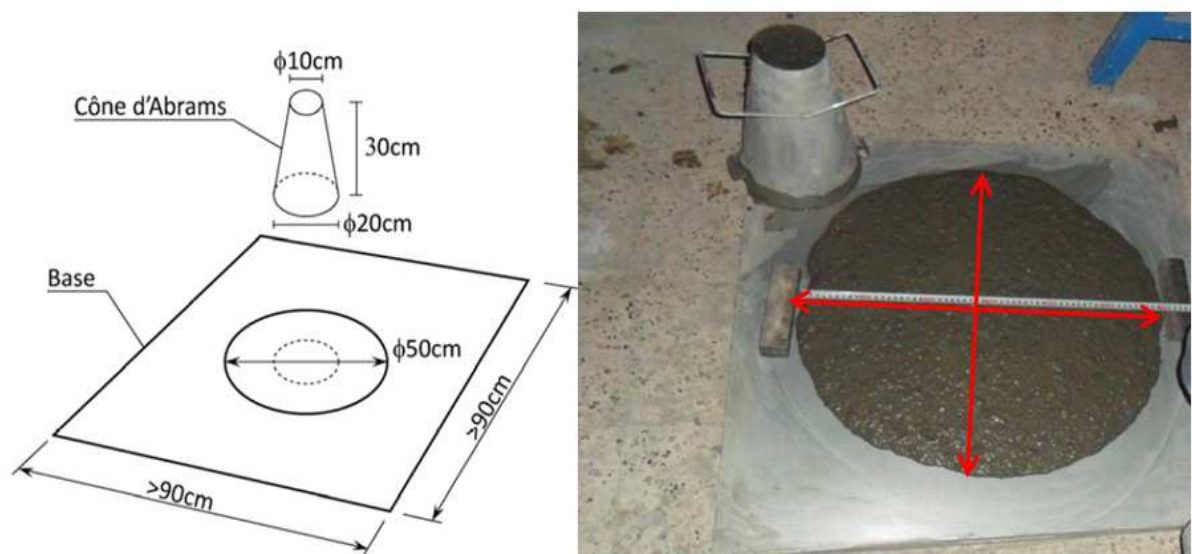


Figure 2.8: Essai d'étalement.

Dans tous les cas, les BAP ne doivent présenter aucun signe visible de ségrégation ou de ressuage lors de l'essai d'étalement [47].

La recommandation d'AFGC [47] prévoit une répartition des BAP en trois classes (Tableau 2.6).

Tableau 2.6: Classes d'étalement [47].

Classe	Etalement (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

### b. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Cet essai permet d'évaluer la mobilité du béton en milieu confiné. L'essai d'écoulement au V-Funnel (Figure 2.9) mesure le temps d'écoulement d'un échantillon de béton à travers un entonnoir de dimension spécifiée.

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

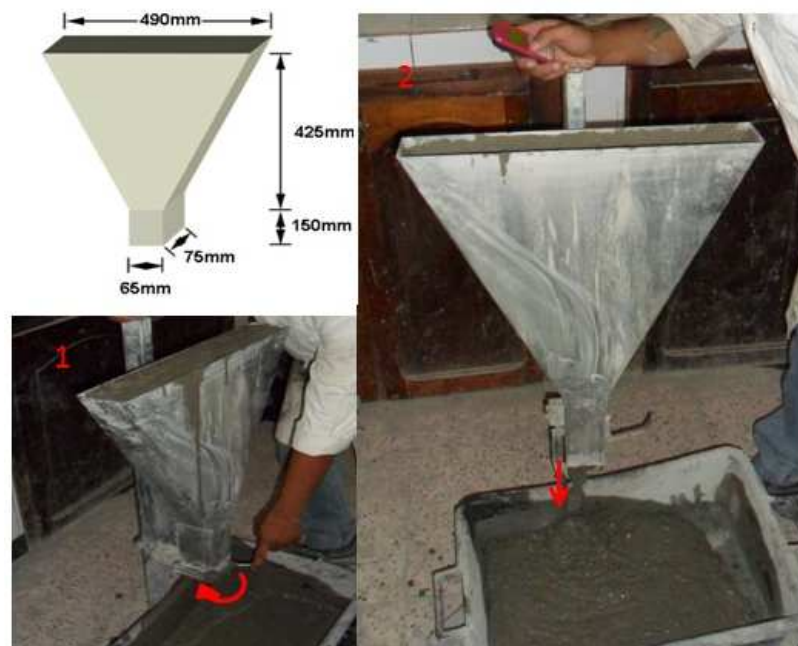


Figure 2. 9: Essai V-funnel.

### c. Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L fait partie des essais de caractérisation de la mobilité en milieu confiné. Il vérifie que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures.

Dans cet essai, un échantillon de béton est coulé en une seule fois dans la partie verticale de la boîte. On ouvre ensuite la trappe située en partie inférieure et on observe l'écoulement à travers une série d'armatures séparant la partie verticale et la partie horizontale de la boîte. Le résultat est représenté par le ratio  $H2/H1$  (Figure 2.10) avec un ratio minimal fixé à 0,80.

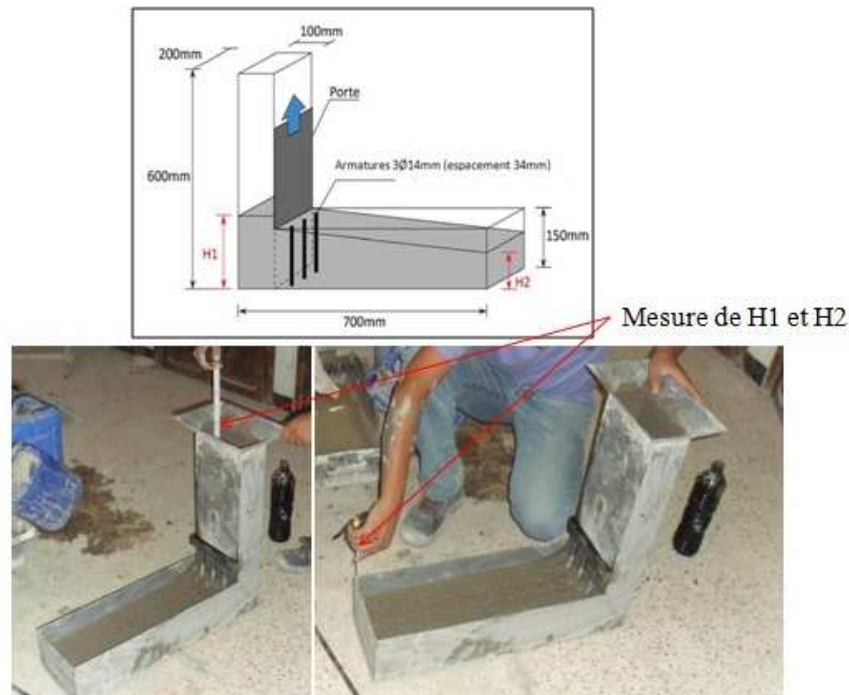


Figure 2.10 : Essai de la boîte en L.

- Mesures à prendre :

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

- 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 400 mm (dans la partie horizontale).
- Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs  $H1$  et  $H2$  (Figure 2.10).

#### d. Essai de résistance à la ségrégation par tamisage

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité [47].

Un échantillon de 10 l de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser  $4,8 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$  de l'échantillon sur un tamis de 5 mm avec une hauteur de 50 cm  $\pm 5$  cm. Après 2 min d'attente, on pèse le poids de laitance qui est passée à travers du tamis

et on calcule le pourcentage de la laitance selon l'expression  $\%_{Laitance} = \frac{P_{Laitance}}{P_{Echantillon}} \times 100$



Figure 2.11 : Essai de stabilité au tamis.

### 2.3.3.2 Essai à l'état durci

#### a. Résistance à la compression

La qualité du béton est généralement caractérisée par la mesure de la résistance à la compression. L'importance de cette grandeur en termes de qualité du béton est reliée directement à la composition de la pâte de ciment.

L'essai de résistance à la compression a été effectué sur une presse de capacité de 3000 kN (Figure 2.13), conformément à la norme NF P 18-406 [67], la vitesse de chargement est de 0.5 kN/s.

La résistance en compression des bétons est mesurée sur des éprouvettes cubiques  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$  pour chaque mélange du béton à l'âge de 28 et 90 jours.





Figure 2.12 : Dispositif de l'essai de compression simple.

#### b. Absorption capillaire

Cet essai consiste à mesurer le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons, non saturés, mise en contact avec l'eau sans pression hydraulique.

Avant les mesures de sorptivité, les éprouvettes sont pré-conditionnées selon les recommandations de la procédure d'ASTM [68].

L'essai a été réalisé sur des échantillons moulés de formes cubiques (100x100x100 mm), les éprouvettes ont été conservées dans une étuve ventilée à  $80 \pm 2$  °C, jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées soit inférieure à 0.1%. Les faces latérales des éprouvettes ont été enduite par une résine (meda poxy colle) pour assurer l'écoulement unidirectionnel et éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée.

L'essai de l'absorption capillaire a été réalisé suite à ce pré-conditionnement. Les éprouvettes ont été émergées dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 5 mm à l'aide des cales (Figure 2.13). A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge, pesées puis relancer dans le récipient. Les échéances sont les suivantes : 1mn, 5mn, 10 mn, 20mn, 30mn, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 1jour, 2 jours, 3 jours, 4 jours, 5 jours, 6 jours, 7 jours, 8 jours. L'essai est terminé après huit jours.



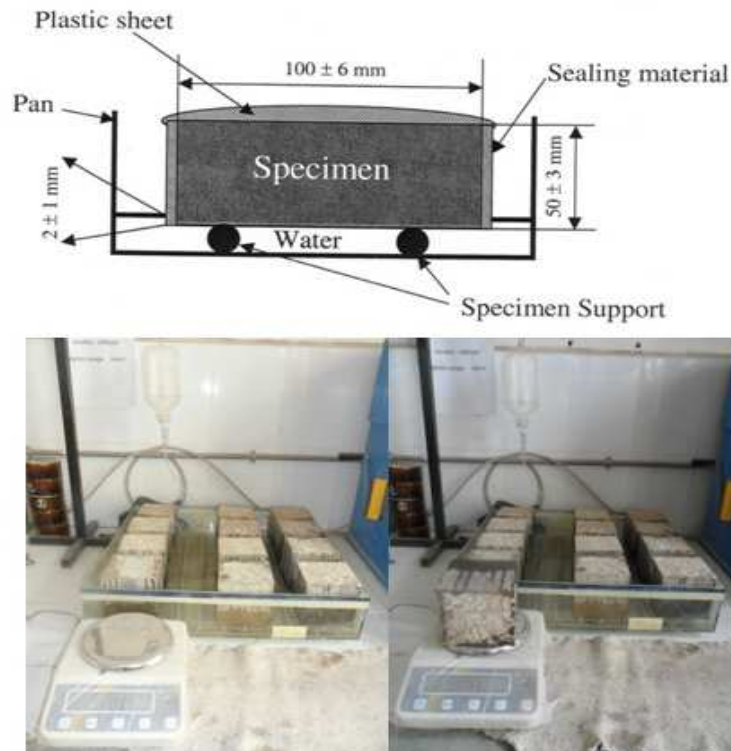


Figure 2.13 : Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité.  
Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$C = \frac{(M_x - M_0)}{A} \quad [\text{kg}/\text{m}^2] \quad 2.5$$

Où

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

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

$A$  : section de l'éprouvette ( $\text{m}^2$ ).

Le coefficient de sportivité ( $s$ ) du béton peut être déterminé de l'expression suivante :

$$S = \frac{(Q/A)}{\sqrt{t}} \quad 2.6$$

Où :

$A$  : surface du spécimen en contact avec l'eau en  $\text{cm}^2$ ,

$Q$  : le volume d'eau absorbé en  $\text{cm}^3$ ,

$t$  : temps écoulé en (s),

$S$  : coefficient de sportivité du spécimen en  $\text{cm}/\text{s}^{1/2}$ .

On trace  $Q/A$  en fonction de  $\sqrt{t}$ , puis on trace la régression linéaire entre  $Q/A$  et  $\sqrt{t}$ , puis on calcule les deux pentes des deux lignes droites qui donnent le coefficient de sorptivité ( $s$ ) des grands pores et des petits pores.

### c. Perméabilité à l'eau

Les essais de perméabilité à l'eau ont été effectués selon la norme DIN 1048 [69]. Cet essai permet de mesurer sur des éprouvettes cubiques de dimension 150 mm, la profondeur de pénétration d'eau sous un gradient de pression de 5 bars pendant une période de  $72h \pm 2$  (Figure 2.14). L'essai a été réalisé à l'âge de 90 jours sur des éprouvettes conservées dans deux différents modes de cure. La pression est appliquée sur la surface inférieure au centre d'éprouvette. Après 72 heures de l'application de la pression, les spécimens sont ensuite divisés en deux parties par le biais de l'essai de traction par fendage (essai Brésilien, Figure 2.15). A l'aide d'un pied à coulisse, la profondeur de pénétration de l'eau en hauteur est mesurée (Figure 2.16).

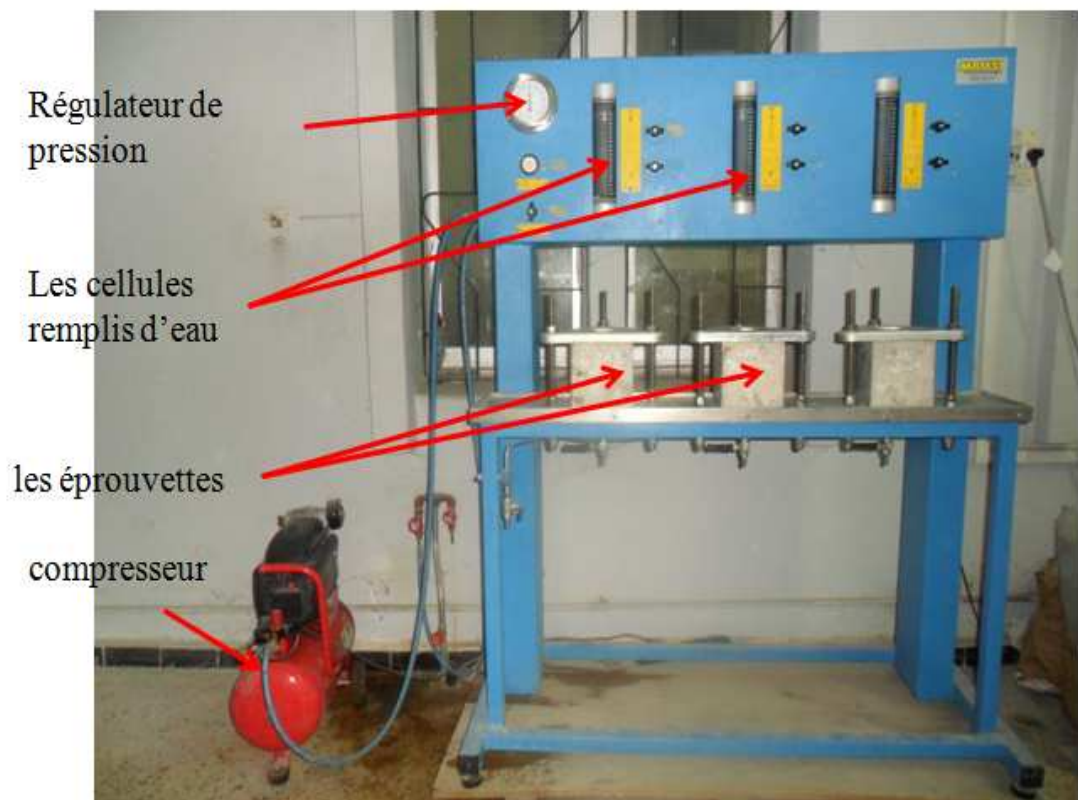


Figure 2. 14 : Essai de perméabilité à l'eau.



Figure 2.15 : Essai Brésilien.



Figure 2.16 : Mesure de la profondeur de pénétration d'eau.

#### d. La porosité accessible à l'eau

L'essai de la porosité accessible est par définition le pourcentage du volume des vides  $V_v$  par rapport le volume total  $V_t$ .

Il s'agit de la détermination par pesée de la masse apparente d'un échantillon du béton après immersion dans l'eau avec lequel il a été saturé sous vide.

Pour déterminer la masse sèche, les éprouvettes ont été séchées dans une étuve à une température de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à ce que deux pesées successives, avant et après 24h à l'étuve ne dépasse pas 0.1%. La masse  $M_{\text{sec}}$  de l'éprouvette est mesurée sur une balance au centième de gramme près.

L'échantillon est placé dans une enceinte fermée (dessiccateur), sous une pression constante pendant 4 heures. Ensuite l'eau est introduite progressivement jusqu'à

remplissage et le corps en béton soit recouvert d'environ 20mm d'eau, puis on déconnecte la pompe (Figure 2.17).

L'échantillon est maintenues dans la saturation pendant  $18 \pm 2h$ , les éprouvettes ont été sorties du récipient et pesées dans l'eau et dans l'air avec une balance hydrostatique pour déterminer respectivement  $M_{eau}$  pour  $M_{air}$ .

La porosité accessible à l'eau,  $\varepsilon$ , est exprimée en pourcentage en volume, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad 2.7$$

$M_{eau}$  : la masse du spécimen immergé dans l'eau,

$M_{air}$  : la masse du spécimen pesé dans l'air,

$M_{sec}$  : la masse du spécimen sec.



Figure 2.17 : Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes

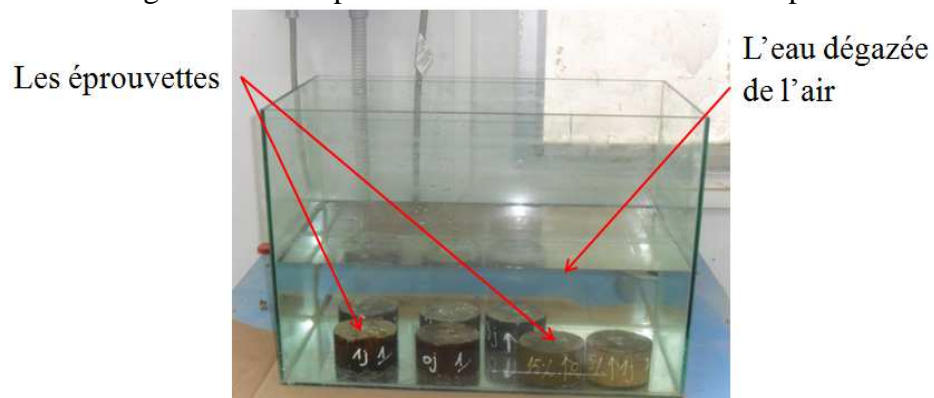




Figure 2.18 : Saturation des éprouvettes dans l'eau.

#### 2.4. Mode de cure

La cure est la procédure utilisée pour maintenir une quantité d'humidité suffisante et une température favorable dans le béton durant l'hydratation du ciment si bien que les propriétés désirées sont développées.

Dans notre étude, Les éprouvettes ont été conservées en respectant deux modes de cure différents :

- dans l'eau douce humide, avec 100% de HR et  $T 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  (Figure 2.19),
- A l'air libre après une cure humide initiale de 0, 1, 3, 7,14 et 28 jours (Figure 2.20).



Figure 2.19 : Epreuves conservées dans l'eau douce.



Figure 2.20 : Epreuves conservées à l'air libre

## 2.5. Récapitulatif des essais réalisés

La figure 2.21 résume le programme expérimental que nous avons réalisé.

L'étude expérimentale est divisée en deux parties. La première partie expérimentale a été consacrée pour la formulation du béton en se basant sur la méthode japonaise et la deuxième partie, nous avons étudié l'effet de laitier substitués au ciment et de l'environnement sur la durabilité du béton autoplaçant. Les pourcentages de laitier utilisés sont de 0, 15, et 25%. Deux modes d'environnements de cure ont été étudiés dans la présente étude :

- une cure humide dans l'eau (HR =100% et  $T=20 \pm 2$  °C) ;
- à l'air libre dans la zone de Blida pendant la période de l'été, après une cure initiale de 1, 3, 7,14 et 28jours. Des essais ont été réalisés à court et à long terme, notamment les essais rhéologiques sur le BAP (Etalement, V-funnel, L-BOX et la stabilité au tamis), et la durabilité du béton (Porosité accessible à l'eau, Absorption d'eau par capillarité Perméabilité à l'eau et la Résistance mécanique).

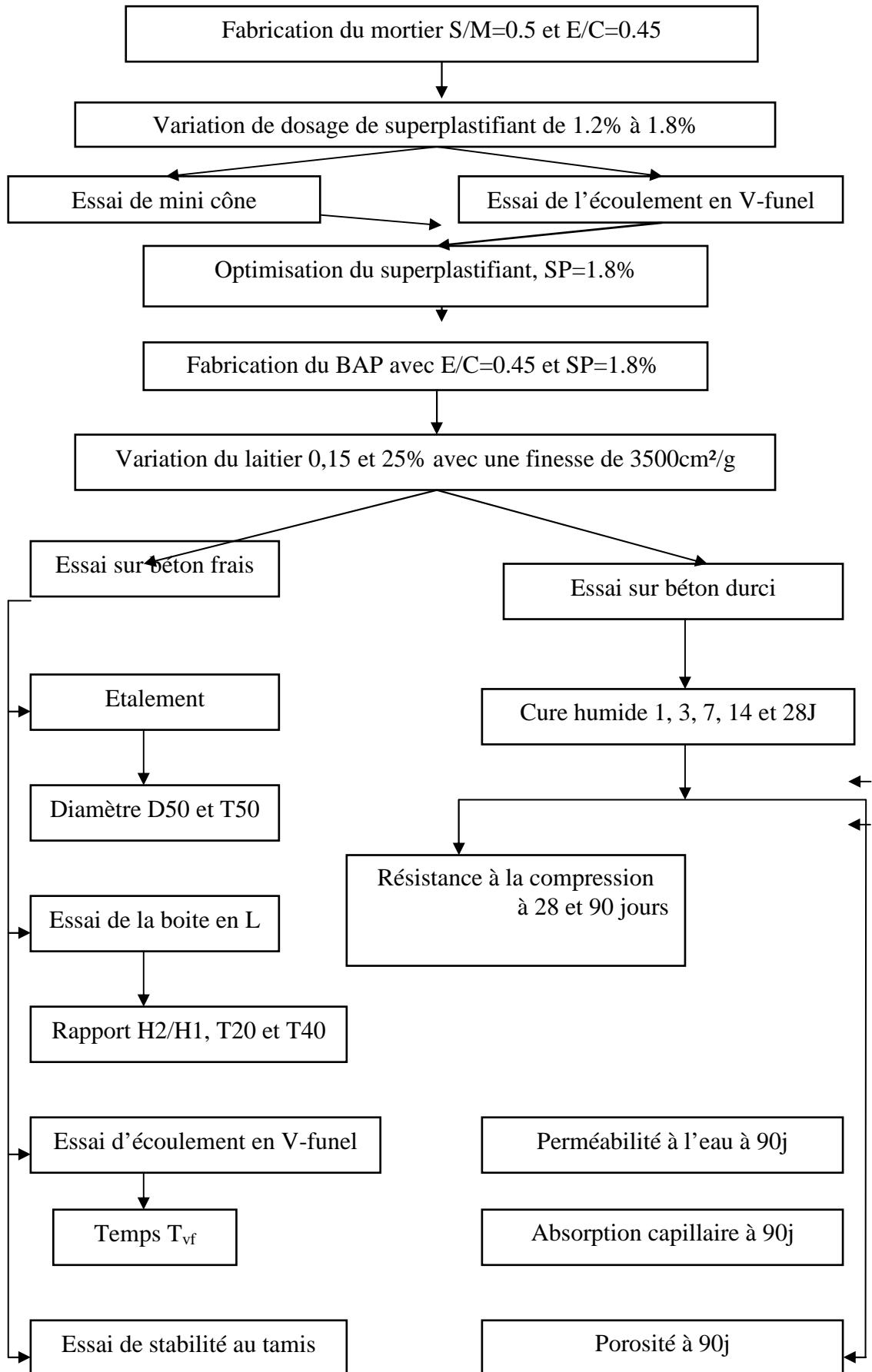


Figure 2.21 : Organigramme des différents essais réalisés sur le béton.

## CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats obtenus expérimentalement sur l'effet du laitier sur les propriétés mécaniques et sur la durabilité du BAP dans deux modes de cure différents (un environnement standard ( $T=20^{\circ}$ , H.R=100%) à l'intérieur du laboratoire et le climat chaud de l'extérieur sur la toiture du laboratoire durant l'été).

### 3.2 Optimisation de dosage du superplastifiant

L'optimisation de dosage en superplastifiant permet d'évaluer la fluidité et la stabilité des pâtes de ciment en comparant différents dosages, pour avoir une fluidité maximale et une meilleure stabilité du béton. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, on a fixé le rapport E/C à 0,45 et le volume du sable à 50% du volume total de mortier [63]. L'objectif de cette partie est d'étudier le comportement rhéologique de mortier, afin de déterminer le dosage optimal en superplastifiant (SP/L) utilisé dans la formulation de notre BAP. Dans ce contexte, on a effectué deux essais sur mortier : essai de mini cône et essais V-Funnel. Pour chaque dosage de superplastifiant en poids de ciment (1,2 ; 1,4 ; 1,6 ; 1,8 et 2%), des mesures d'étalement et du temps d'écoulement ont été effectués sur les mortiers correspondants. Les différentes compositions obtenues pour 1.81 litres de mortier en fonction du rapport optimale SP/L sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Compositions des mortiers obtenues en fonction du rapport optimale SP/L.

constituants	MOR 0% laitier	MOR 15% laitier	MOR 25%laitier
Ciment (kg)	1.162	0.993	0.879
Laitier (kg)	0	0.165	0.276
Sable (kg)	2.331	2.331	2.331
Eau (kg)	0.5	0.5	0.5
SP 1.8% (kg)	0.021	0.021	0.021



### 3.2.1 Essai de mini cône

Les résultats de l'essai d'étalement des mortiers autoplaçants sont présentés dans le tableau 3.1 et illustrés sur la figure 3.1.

Tableau 3.1 : Valeurs d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant.

Teneur en superplastifiant (%)	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
Etalement (mm)	280.5	289	291	295	297	305

La figure 3.1 représente les résultats de l'étalement effectué sur le MAP, en faisant varier le dosage en superplastifiant. Ces résultats révèlent l'existence d'un dosage optimal et un dosage de saturation. Chaque dosage de SP permet d'avoir une valeur d'étalement dans l'intervalle d'étalement des MAP définie par Domone et Jin [73]. En revanche, on remarque une ségrégation et un ressuage visuel pour le dosage en SP de 2 et 2.2%.

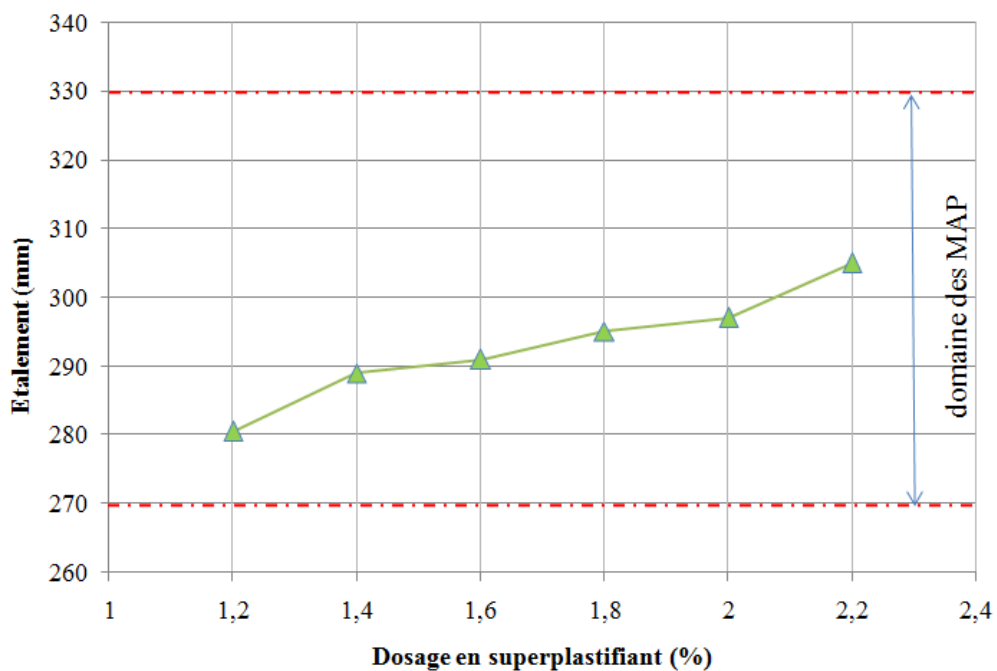


Figure 3.1: Valeurs d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant.

### 3.2.2 Essai de V-funnel

Les résultats de l'effet de dosage de superplastifiant sur le temps d'écoulement sont donnés dans le Tableau 3.3 et illustrés sur la Figure 3.2.

Tableau 3.3: Valeur de temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant

Superplastifiant (%)	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
Temps d'écoulement (sec)	14.3	7.9	7.51	6.88	7.87	7.5

Ce dispositif permet en effet de mesurer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de mortier passant à travers une ouverture étroite ; plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante.

Les résultats de temps d'écoulement en V-funnel montrent que tous les dosages vérifient les exigences normatives ( $T_{vf} < 10s$ ) à l'exception du dosage 1.2% qui a donné un temps d'écoulement au V-Funnel plus élevé. Le dosage en Sp/L=1.8% a donné le temps le plus court c'est-à-dire la fluidité la plus importante. Donc on peut conclure que le dosage optimal de superplastifiant est Sp/L=1.8%, sans présence de ségrégation ni de ressuage. En plus, toute augmentation de dosage en superplastifiant au-delà de 1,8% du poids de ciment n'a plus d'effet important sur la rhéologie du mortier. Le superplastifiant améliore l'ouvrabilité du mélange, mais à partir d'un certain seuil il devient inutile parce qu'il atteint le dosage de saturation qui ne permet pas de modifier de façon significative la rhéologie du mélange [74].

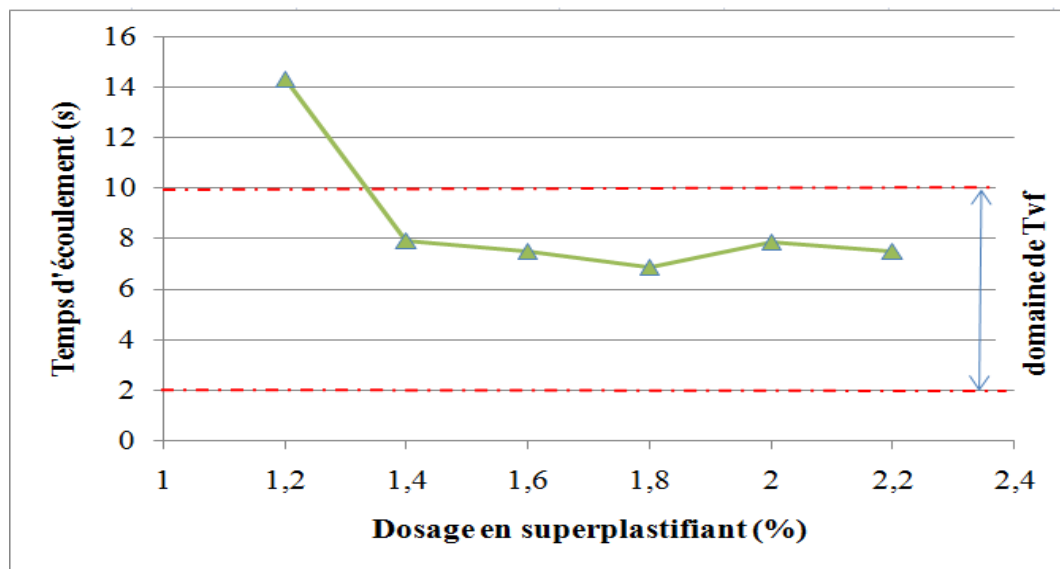


Figure 3.2 : Temps d'écoulement en fonction de dosage de superplastifiant.

### 3.3 Effet du laitier sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais

Après avoir caractérisé le mortier et déterminé le dosage optimal en superplastifiant, l'influence du laitier sur le comportement rhéologique de BAP, son ouvrabilité, sa mobilité en milieu confiné et sa stabilité à la ségrégation ont été étudiés. Notre formulation a été caractérisée par :  $S/M=0.5$ ,  $Sp=1.8\%$  et  $E/L=0.45$ . La finesse du laitier a été maintenue constante à  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Trois compositions ont été élaborées en changeant le taux de substituant de laitier de 0, 15 et 25%. Le tableau 3.4 récapitule les trois compositions des BAP testés avec comme béton de référence le BAPR qui contient 0% de laitier.

Tableau 3.4 : Composition des BAP testés.

Compositions	Unité	BAP R 0% L	BAP 1 15% L	BAP 2 25% L
Ciment	kg/m <sup>3</sup>	459.53	392.59	347.59
Laitier	kg/m <sup>3</sup>	0	65.25	109.12
Gravier (3/8)	kg/m <sup>3</sup>	247.31	247.31	247.31
Gravier (8/15)	kg/m <sup>3</sup>	494.28	494.28	494.28
Sable	kg/m <sup>3</sup>	925.72	925.72	925.72
Eau	kg/m <sup>3</sup>	203.084	203.084	203.084
Superplastifiant	kg/m <sup>3</sup>	8.27	8.27	8.27

Les essais de caractérisation de ces bétons ont été effectués selon les guides Européens du BAP [76], dont les valeurs limites sont données dans le Tableau 3.5. Les résultats des essais sur l'ouvrabilité des différents bétons autoplacants sont donnés dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Valeurs recommandées pour les essais du BAP [76].

Essai	Unité	Valeurs limites	
Essai d'Étalement	Étalement S	mm	550 - 850
	Temps d'Écoulement T <sub>50</sub>	sec	2 - 5
Essai V-Funnel	Temps d'Écoulement	sec	6 - 12
Essai de ségrégation	Laitance passant à travers le Tamis	%	0 - 15
Essai L-Box	Rapport des Hauteurs (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )	/	0,8 - 1
	T <sub>20</sub> et T <sub>40</sub>	sec	/

### 3.3.1 Étalement et Temps $T_{50}$ au cône d'Abrams

Les résultats de l'essai au cône d'Abrams obtenus sont regroupés dans le tableau 3.6. La figure 3.3, présentant la variation de l'étalement et du temps  $T_{50}$  du béton en fonction de la teneur en laitier.

Tableau 3.6 : Valeurs de l'étalement et le temps d'étalement  $T_{50}$  au cône d'Abrams.

Laitier %	Finesses (3500 cm <sup>2</sup> /g)			
	Étalement (mm)	Étalement Admissible (mm)	Temps d'étalement $T_{50}$ (sec)	$T_{50}$ Admissible (sec)
0	623	550-850	2.78	2-5
15	735		2.5	
25	752		2.4	

La figure 3.3 montre l'effet de la teneur en laitier sur l'étalement. On remarque que l'étalement de la galette du béton augmente de 623 mm à 752 mm (augmentation de 17%) pour un taux de substitution de 0% et 25% respectivement, tout en restant dans la marge des valeurs correspondantes au BAP [72] (c.-à-d. entre 550 mm et 850 mm).

On observe également sur cette figure que le laitier améliore l'ouvrabilité du béton et on note que le pourcentage de 25% de laitier donne la plus grande valeur d'étalement sans ségrégation ni ressuage. En plus, on peut remarquer à partir de la figure 3.3 qu'un taux de substitutions de 25% donne la plus faible valeur de  $T_{50}$  (2.5 s) avec un étalement acceptable de 752 mm. Donc, on peut conclure que le taux de substitution de 25% de ciment par le laitier est considéré comme le dosage optimal qui permet de vérifier la capacité de remplissage à l'état libre en absence d'obstacles.

D'après Boukendakdji et al. [75], la substitution du ciment par le laitier d'un pourcentage de 0 à 25% donne des valeurs d'étalement acceptable varient de 630 à 787 mm et un temps d'étalement  $T_{50}$  varie de 0,66 et 1,25 seconde. Une bonne fluidité avec l'augmentation de teneur en laitier jusqu'à 15% a été observé, par la suite le temps d'écoulement  $T_{50}$  augmente, mais avec la présence du ressuage et de la ségrégation [75]. Aarre et Domone [76] ont proposé un étalement entre 650 et 700 mm, et un temps  $T_{50}$  écoulement de 2-4 s, correspondant aux mélanges contenant entre 10-15% de laitier. Le dosage optimal du

laitier qui donne un bon BAP sans présence de ségrégation est de 15%. Selon Li et Ding [96], l'incorporation du laitier à raison de 20 à 30% dans le mortier améliore son ouvrabilité.

Selon Her-Yung et Chih-Chung [77], l'addition du laitier comme substituant de ciment améliore les propriétés à l'état frais. Les résultats montrent que l'étalement varie en fonction du taux de substitution de laitier de haut fourneau par le ciment Portland. Le dosage optimal est de 15% de laitier.

D'après Mucteba Uysal et Kemalettin Yilmaz [78], les bétons qui contiennent des ajouts minéraux ont montré une meilleure performance que les bétons sans ajout en ce qui concerne la maniabilité. L'utilisation des additions minérales dans le BAP vise à accroître la distribution des particules de la matrice de la poudre, et par conséquent, de réduire les frottements entre particules.

Une augmentation d'étalement a été observée jusqu'à 20% de laitier avec un optimum de 15%, mais plus la teneur en laitier augmente plus la ségrégation et de la viscosité augmente [79].

Guneyisi et al. [80] ont montré que l'étalement des BAP est lié principalement au rapport E/L, le type et la quantité des additions minérales utilisée dans la fabrication de béton.

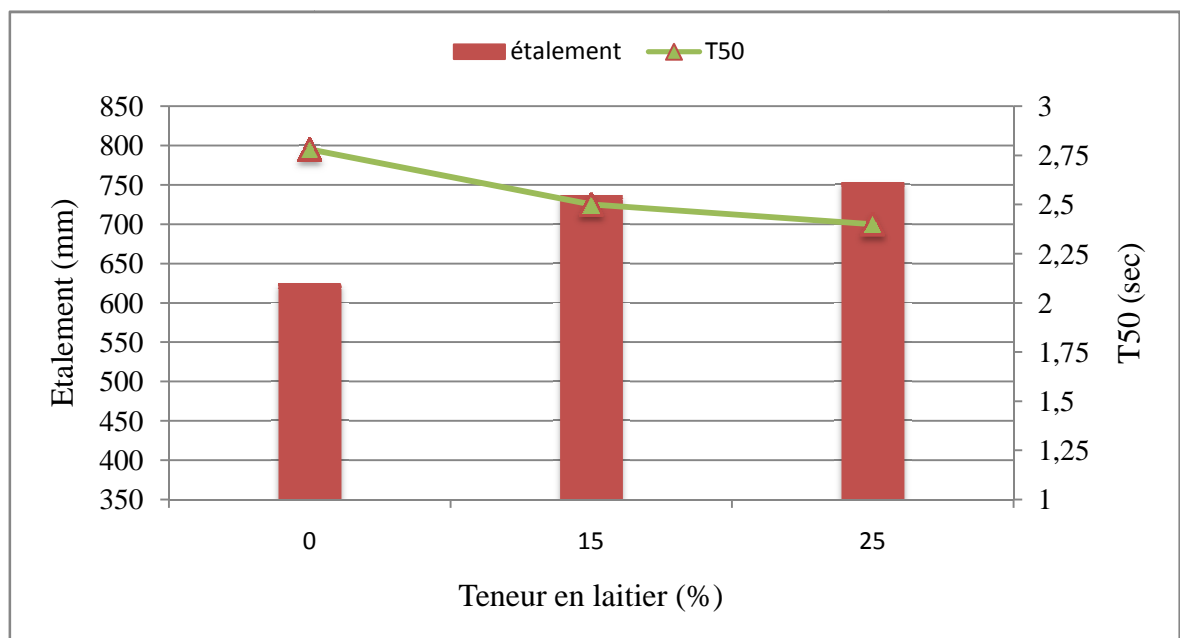


Figure 3.3 : Etalement et le temps d'écoulement T50 en fonction de la teneur en laitier.

### 3.3.2 Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel

L'essai consiste à évaluer la mobilité du béton à passer à travers les zones confinées par la mesure du temps d'écoulement à travers l'entonnoir (en seconde). Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du pourcentage de laitier sont indiqués sur le tableau 3.7 et la figure 3.4. Cet essai indique la capacité de remplissage du mélange.

Tableau 3.7 : Valeurs de temps d'écoulement au V-Funnel ( $T_{V\text{-Funnel}}$ )

Laitier %	Finesses ( $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ )	$T_{Vf}$ Admissible (sec)
	Temps d'écoulement $T_{Vf}$ (sec)	
0	9.43	6-12
15	7.85	6-12
25	7.66	6-12

La figure 3.5 montre l'effet de la teneur en laitier sur le temps d'écoulement à l'entonnoir en V-funnel. On note que le temps d'écoulement  $T_{Vf}$  diminue légèrement avec l'augmentation du dosage de laitier. Les valeurs vérifient les recommandations puisque  $T_{Vf} < 10$  secondes [73]. L'optimum est obtenu à 25% de laitier avec une valeur de  $T_{V\text{-Funnel}}$  de 7.66 s.

Mehmet et al. [81], ont observé que l'utilisation de ciment ternaire (ciment portland, fumée de silice et laitier) satisfait les recommandations d'EFNARC [72] en termes de temps d'écoulement de V-funnel. Le temps d'écoulement de V-Funnel optimum est obtenu pour 15% de laitier [75].

Mehmet et al. [82], ont observée que l'incorporation de filler calcaire a présenté un temps d'écoulement  $T_{Vf}$  inférieur à celui de mélanges de la poudre de marbre. Ce résultat peut être attribué à la finesse des fillers. D'autre part, l'inclusion de cendres volantes a eu le temps d'écoulement relativement le plus court.

D'après Eva et al. [83], les propriétés rhéologiques de laitier de haut fourneau ne représentent aucune contrainte d'écoulement car le laitier augmente le diamètre d'étalement et sert à diminuer le temps d'écoulement  $T_{vf}$ .

Selon Dinakar et al. [84], le temps d'écoulement V-funnel présente également un comportement proportionnel à la teneur de l'addition minérale. Le dosage des cendres volantes jusqu'à 50% de substitution diminue  $T_{vf}$ . De nombreux chercheurs ont utilisé à la fois le T50 et à la fois V-funnel comme indicateurs de la viscosité des bétons très fluides.

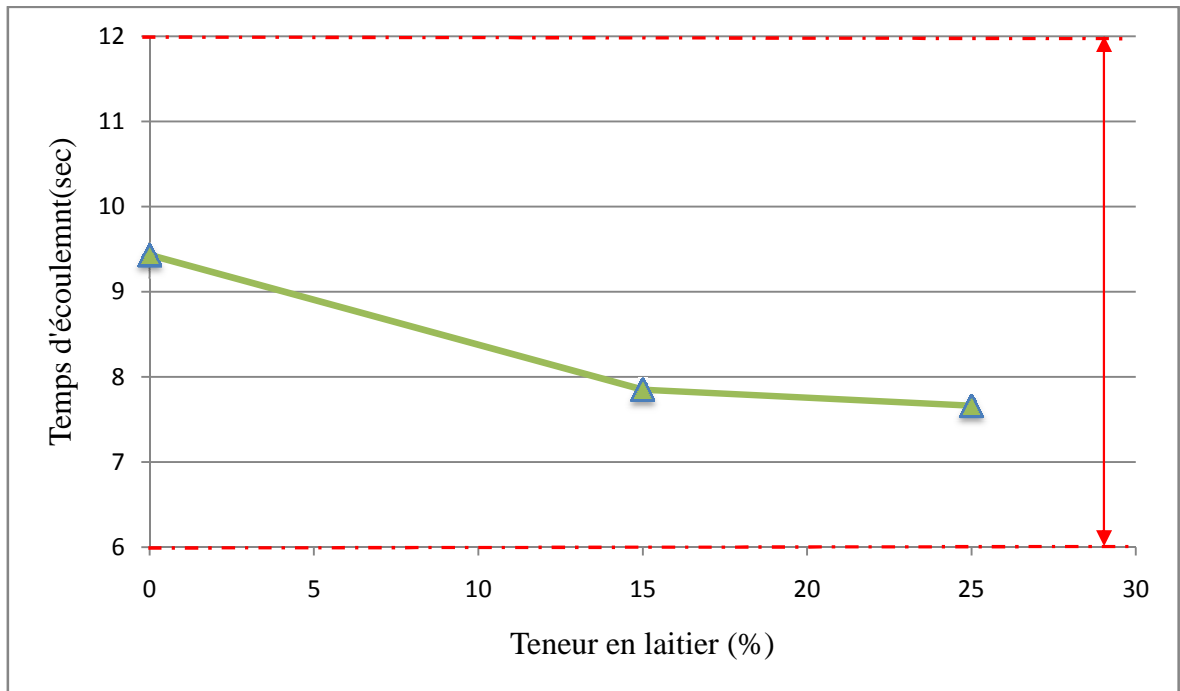


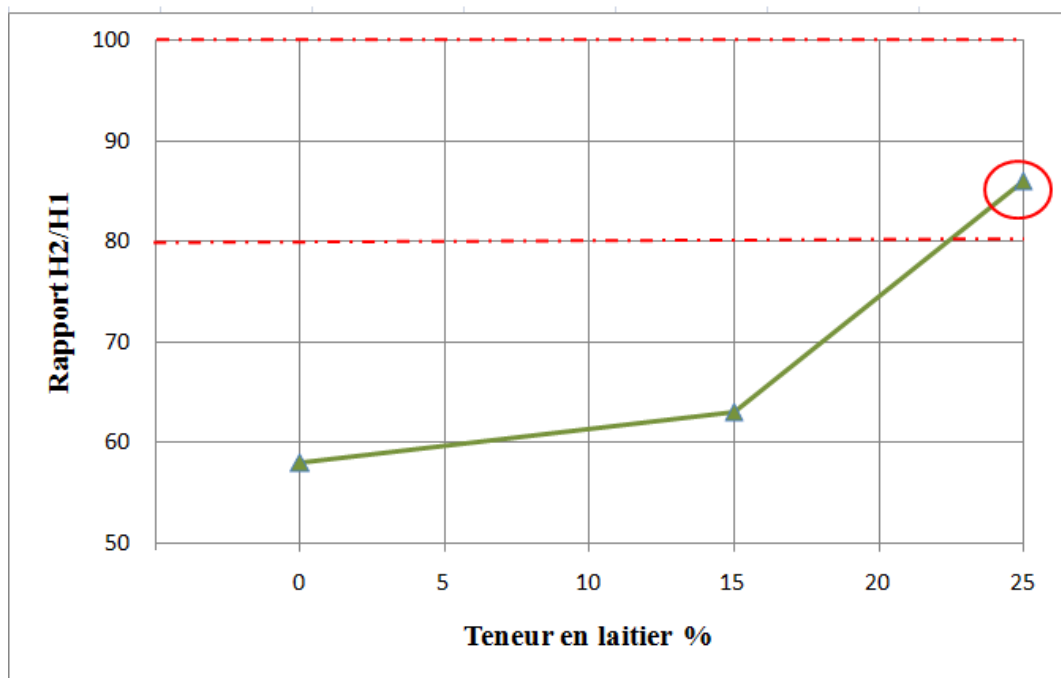
Figure 3.4 :  $T_{V-Funnel}$  en fonction de la teneur en laitier.

### 3.3.3 Mesures du rapport $H_2/H_1$ , les temps d'écoulement $T_{20}$ et $T_{40}$ de l'essai L-Box

L'essai de la boîte en L (L-Box) donne une bonne appréciation sur la capacité de remplissage, de passage et de la résistance à la ségrégation. Les résultats du rapport  $H_2/H_1$ ,  $T_{20}$  et  $T_{40}$  obtenus en fonction du pourcentage du laitier sont présentés sur le tableau 3.8 et sur les figures 3.5 et 3.6.

Tableau 3.8 : Valeurs du rapport  $H_2/H_1$ ,  $T_{20}$  et  $T_{40}$  de l'essai de L-Box.

Laitier %	Finesses ( $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ )			
	Rapport $H_2/H_1$	$H_2/H_1$ Admissible	$T_{20}$	$T_{40}$
0	0.58	0.8-1	0.71	1.9
15	0.63	0.8-1	0.69	1.43
25	0.86	0.8-1	0.57	1.01

Figure 3.5 : Rapport  $H_2/H_1$  en fonction de la teneur en laitier.

On remarque que le rapport  $H_2/H_1$  est de 0,58 et 0,63 pour les BAPR (sans ajouts) et BAP avec 15% laitier. Un taux de remplissage inférieur à 80% veut dire un risque de blocage. La raison de la faible valeur de  $H_2/H_1$  est due au mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage qui cause les problèmes de blocage ou de ségrégation. On remarque aussi que plus le pourcentage de laitier augmente plus le rapport  $H_2/H_1$  tend vers 1, mais avec une valeur optimale à 25% de laitier. L'augmentation du taux de substitution de 15% à 25% augmente le rapport  $H_2/H_1$  de 0,63 à 0,86.



Mucteba et Kemalettin [78], ont observé que l'augmentation du pourcentage des additions minérales tel que le calcaire, le marbre et le basalte dans le BAP, n'affecte pas le rapport de blocage. Cependant, on peut noter que chaque BAP étudié présente une capacité de remplissage et de passage suffisante.

En générale l'utilisation des ajouts minéraux comme le fumé de silice, cendres volantes et le laitier améliorent d'une manière appréciable les propriétés d'ouvrabilité du BAP [85]. Mehmet et al. [81] ont conclu que l'incorporation des ajouts minéraux tel que la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier augmentent le rapport de L-Box ( $H_2/H_1$ ), ce qui montre l'amélioration de la capacité de remplissage et de passage des BAP.

Dinakar et al. [84] ont observé que le rapport  $H_2/H_1$  de la boîte en L présentent des valeurs supérieures à 0,8 pour les BAP à base de cendres volantes avec un taux de substitution de 30 à 70% à l'exception du taux de 10% en raison de son comportement thixotrope [84].

D'après Rahmat et Mousavi [86], la substitution partiel du ciment par le metakaolin diminue la capacité de passage des BAP mais d'autres chercheurs n'ont pas observé l'effet de blocage dans le test de la L-boîte.

Miao Liu [87] a montré la possibilité de production d'un BAP avec un pourcentage de 80% de cendres volantes. La substitution de cendres volantes conduit à une réduction de la conservation de la consistance et de la capacité de passage lorsque la capacité de remplissage est maintenue constante.

Mucteba et al. [88] ont fabriqué un BAP à base des additions minérales (fumée de silice, poudre de marbre, laitier de haut fourneau, calcaire, poudre de basalte), les meilleures performances d'ouvrabilité ont été obtenu avec l'addition de la fumé de silice.

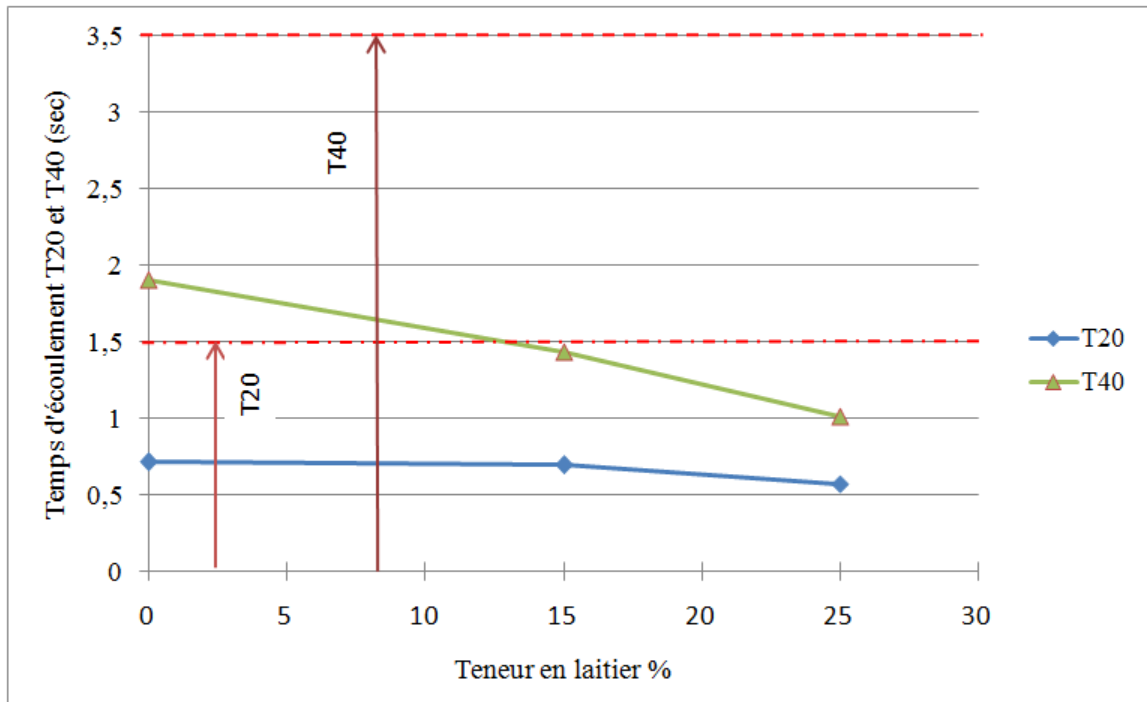


Figure 3.6 : Temps d'écoulement  $T_{20}$  et  $T_{40}$  en fonction de la teneur en laitier.

Les temps  $T_{20}$  et  $T_{40}$  désignent le temps de passage du béton à la ligne de 20 cm et à celle de 40 cm respectivement. Ils permettent d'évaluer la vitesse d'écoulement et donnent ainsi une indication pour la capacité de remplissage. La figure 3.6 montre la variation de temps d'écoulement  $T_{20}$  et  $T_{40}$  en fonction de la teneur en laitier. On note que les valeurs des deux temps d'écoulement diminuent en fonction de la teneur en laitier et on observe une tendance linéaire en fonction de la substitution du laitier par le ciment. Par conséquent, on peut conclure qu'un taux de substitution de 25% de ciment par le laitier présente un dosage optimal. Le temps d'écoulement  $T_{20}$  et  $T_{40}$  sont vérifiés pour tous les BAP, où ils n'ont pas dépassé la limite inférieure (1.5 sec) et supérieure (3.5 sec) respectivement.

### 3.3.4 Résistance à la ségrégation par tamisage

Le tableau 3.9 et la figure 3.7 montrent les résultats des pourcentages de laitance passant à travers un tamis de 5 mm pour déterminer le degré de ségrégation statique des mélanges en fonction de la teneur en laitier.

Tableau3.9 : Valeurs de la laitance des mélanges en fonction de la teneur en laitier en %

Laitier %	Finesses (3500 cm <sup>2</sup> /g)	
	Pourcentage de laitance %	Laitance admissible %
0	3.52	0-15
15	5.92	0-15
25	8.96	0-15

D'après la figure 3.8, on observe que le pourcentage de la laitance augmente en fonction de l'augmentation de la teneur de laitier. Le laitier de haut fourneau favorise l'instabilité du béton et provoque une tendance à la ségrégation statique. Les valeurs de pourcentage de laitance trouvées présentent une stabilité satisfaisante. Selon les recommandations de l'EFNARC [72], une stabilité satisfaisante est obtenue si le pourcentage de la laitance est inférieur à 15%. D'après Boukendakdji et al. [75], une proportion de 5-15% de l'échantillon passant au tamis offre une résistance optimale à la ségrégation. Dans notre cas, la résistance à la ségrégation est satisfaite avec 15% de laitier. L'addition de 20% et 25% donne du ressuage et de la ségrégation.

Mucteba [89] a montré que tous les mélanges à base des additions minérales ont une bonne viscosité et une résistance à la ségrégation. La ségrégation des tamis de 80% de cendres volantes présente le plus faible pourcentage de laitance [97].

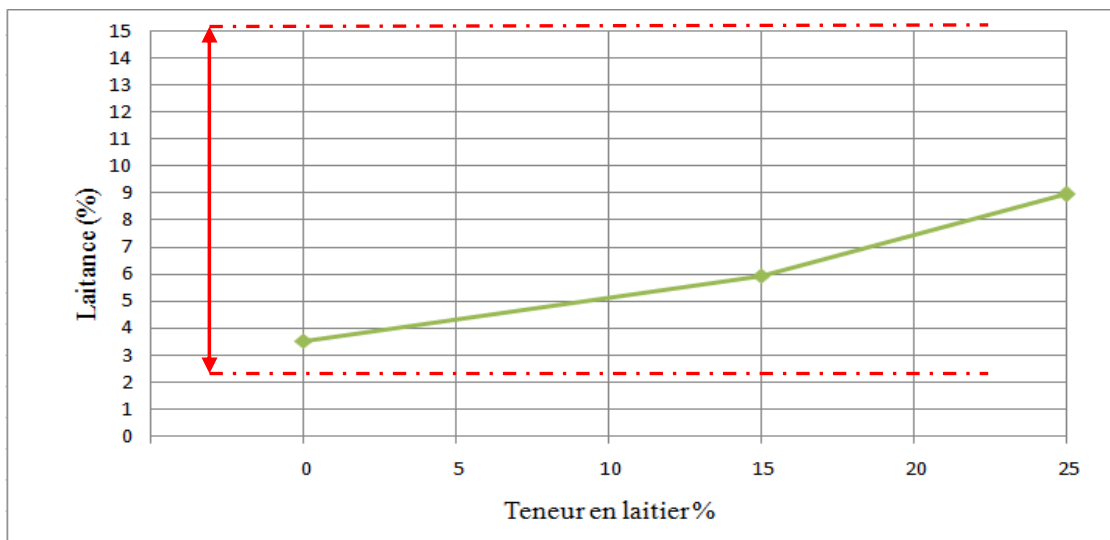


Figure 3.7 : Résistance à la ségrégation par tamisage en fonction de la teneur en laitier.

### 3.4 Effet du climat chaud sur l'état durci des BAP à base du laitier

#### 3.4.1 La résistance mécanique

Les résultats de la résistance à la compression des bétons en fonction de la teneur de laitier et la durée de cure humide (1, 3, 7, 14 et 28 jours) sont récapitulés dans le tableau 3.10 et illustrés sur les figures 3.8 et 3.9.

Tableau3. 10 : Résistance à la compression à 28 et 90 jours des différents bétons étudiés

	Résistance à la compression (MPa)					
	BAP 0 % laitier		BAP 15 % laitier		BAP 25 % laitier	
Cure	Rc28j (MPa)	Rc90j (MPa)	Rc28j (MPa)	Rc90j (MPa)	Rc28j (MPa)	Rc90j (MPa)
0 jour	29.13	34.50	29.95	34.74	30.90	35.60
1 jour	32.26	35.76	30.80	35.90	32.09	36.78
3 jours	32.63	36.61	32.00	37.52	33.82	37.95
7 jours	33.17	38.49	33.75	37.41	35.93	38.70
14 jours	34.08	40.13	35.18	40.50	35.72	41.29
28 jours	36.11	42.25	37.93	43.53	38.50	45.13

Les figures 3.8, 3.9 et 3.10 montrent l'évolution de la résistance à la compression des BAP à base de laitier en fonction de la durée de cure humide ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH}=100\%$ ). Les essais d'écrasement ont été effectués à 28 et 90 jours de durcissement dont les durées de cures sont 0, 1, 3, 7, 14 et 28 jours, conservées ensuite à l'air libre sur la toiture de laboratoire. L'effet de la durée de cure humide et de l'ajout du laitier sont clairement montrés par ces résultats.

On peut constater que la résistance à la compression à 28 jours et la résistance à 90 jours dépendent fortement de la durée de cure. Une des principales observations est que, plus la durée de cure dans l'eau est courte plus les résistances sont faibles et progressent moins dans le temps.

La résistance obtenue à 0 jour de cure (qui a subit aucune cure) ne représente que 80% de la valeur obtenue au même âge mais après 28 jours de cure c.-à-d. un gain de résistance de 20% et on remarque que plus on augmente la durée de cure plus la résistance augmente. On remarque aussi que l'allongement de la durée de cure est surtout efficace pour les premiers jours de cure entre (1 et 3 jours). Pour 3 jours de cure, un gain de résistance de 3.5 MPa a été obtenu, alors que pour une durée de cure de 28 jours, un gain de 7 MPa est obtenu. Par ailleurs, la prolongation de la durée de cure de 7 à 28 jours semble peu envisageable en pratique et donc un optimum pourrait être choisit à 3 jours.

On peut constater que l'augmentation de la substitution de laitier par le ciment de 15 à 25% a conduit à une résistance à la compression à 28 jours qui se rapproche de celle du ciment sans ajout, quelque soit la durée de cure. Ceci est du à l'effet pouzzolanique du laitier qui se développe moins rapidement aux jeunes âges (Figure 3.8).

La résistance à la compression à 90 jours nous renseigne sur le niveau de résistance de béton à long terme et permet d'évaluer le gain de résistance après l'arrêt de cure humide. Les valeurs de résistance en compression à 90 jours varient entre 34.50 à 42.25, 34.74 à 43.57 et 35.60 à 45.13 MPa dont la teneur de laitier est 0, 15 et 25% respectivement.

La résistance à long terme (90 jours) augmente avec la durée de cure, mais cette augmentation est d'autant plus marquée que la substitution de laitier par le ciment est plus élevée. Ceci est du à l'hydratation du laitier qui s'effectue à long terme lentement mais régulièrement. Une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de laitier a été observée à 90 jours. En effet, à 90 jours, cette augmentation est de 0.70 à 3.12% et 3.19 à 6.82% respectivement pour des taux de substitution de 15% et 25%. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par d'autres chercheurs qui ont travaillé sur le BAP à base d'ajouts minéraux.

Heba A. Mohamed [52] a observé que le BAP avec 10% de cendres volantes et 10% de fumée de silice comme substituant donne la résistance du béton à la compression la plus élevée. La plus grande valeur de résistance à la compression est obtenue avec les d'échantillons durcis dans l'eau pendant 28 jours et la valeur la plus faible est obtenue pour les échantillons conservés à l'air libre.

Les BAP avec 15% de fumée de silice donnent des valeurs élevées de résistance à la compression que celles contenant 30% de cendres volantes et les échantillons durcis dans l'eau pendant 28 jours donnent les plus grandes valeurs de résistance à la compression.

D'après Kazim T et al. [54], les BAP avec une durée de cure humide de 7 jours et dans des conditions de cure FR( $T=28^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}=85\%$ ) présentent un gain de résistance à la compression très élevée.

Amrane et Kenai [20] ont rapporté que les résistances des bétons aux laitiers aux premiers âges sont faibles. Pour un béton à 40% de laitier, elles représentent à 3 et à 7 jours 71% et 78% de la résistance du béton témoin. A 28 jours et plus, les résistances deviennent assez comparables sinon meilleurs à celles du béton témoin. La résistance à la compression des mortiers à base de ciments au laitier d'El Hadjar reste faible à jeune âge, mais se développe assez bien à long terme pour des taux de substitution n'excédant pas les 30% [21].

Boukendakdji [63] a observé une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange est observée à tous les âges. En effet, à 28 jours, cette diminution équivaut à 7,36%, 11%, 23,85% et 28,90% respectivement pour des taux de substitution du ciment par du laitier de 10%, 15%, 20% et 25%. Néanmoins, la diminution de la résistance à la compression est moins importante dans le cas des âges avancés (56 et 90 jours après malaxage). La diminution de résistance à la compression pour 15% de laitier est de 7,69 MPa à 28 jours, 4,30 MPa à 56 jours et 3,92 MPa à 90 jours.

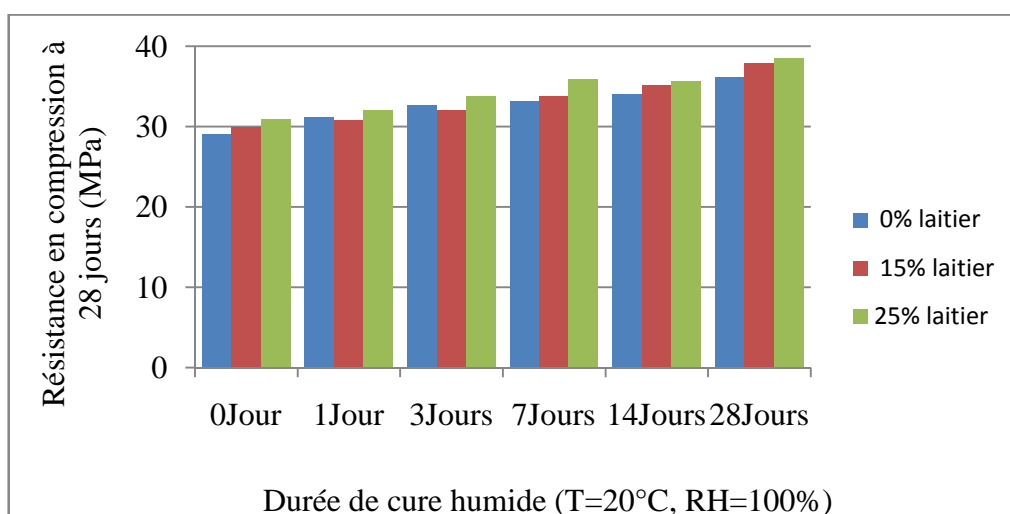


Figure 3.8 : Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 28 jours des BAP à base de laitier.

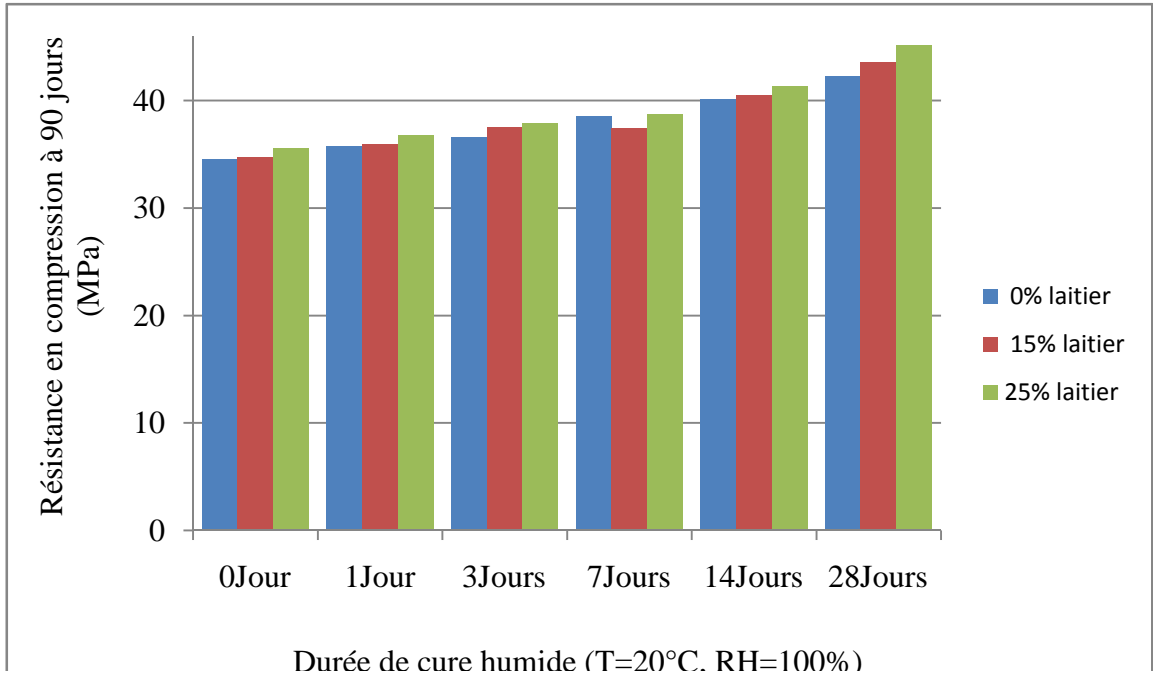


Figure 3.9 : Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 90 jours des BAP à base de laitier.

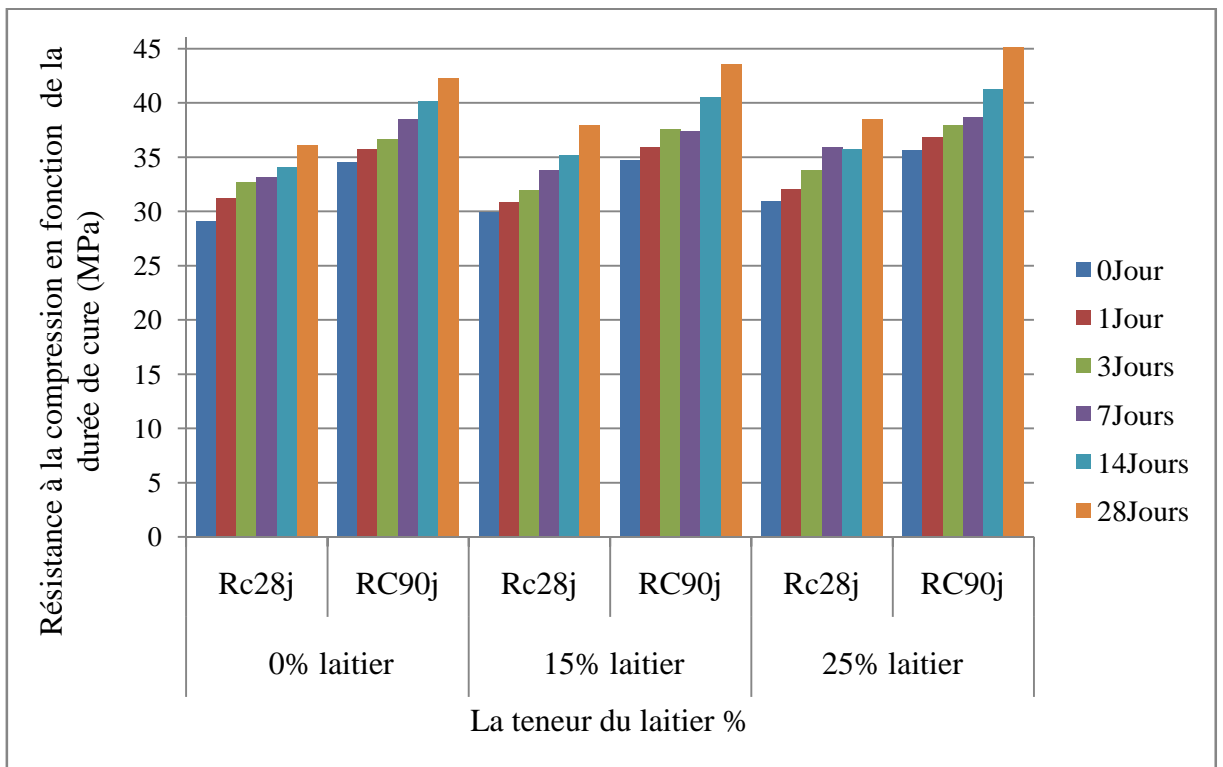


Figure 3.10 : Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 28 et 90 jours des BAP à base de laitier.

### 3.4.2 Absorption capillaire

L'absorption capillaire est due à l'action des capillaires. La mesure de la sorptivité est un moyen qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux. L'absorption capillaire des grands pores a été calculée à 60 minutes et celle des petits pores après huit jours. Les résultats expérimentaux de l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité (I) et la sorptivité (S) en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure sont illustrés sur les figures 3.11 à 3.18. Le tableau 3.11 récapitule les résultats de la quantité d'eau absorbée I et la sorptivité S, calculé par régression linéaire de l'ensemble des mesures (Equation 2.6).

Tableau 3.11: Résultats de l'absorption d'eau par capillarité et sorptivité

Cure		BAP0% laitier	BAP15% laitier	BAP25% laitier
0jour	M (mm)	1.10	0.90	0.93
	S (mm/h <sup>1/2</sup> ) x10 <sup>-3</sup>	10.60	19.80	14.25
1 jour	M (mm)	0.96	0.89	0.88
	S (mm/h <sup>1/2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup>	11.00	16.40	12.75
3 jours	M (mm)	0.71	0.82	0.82
	S (mm/h <sup>1/2</sup> ) x10 <sup>-3</sup>	9.20	9.50	12.00
7 jours	M (mm)	0.76	0.85	0.75
	S (mm/h <sup>1/2</sup> ) x10 <sup>-3</sup>	9.00	9.33	10.88
14 jours	M (mm)	0.76	0.85	0.74
	S (mm/h <sup>1/2</sup> ) x10 <sup>-3</sup>	9.25	9.50	10.75
28 jours	M (mm)	0.70	0.72	0.54
	S (mm/h <sup>1/2</sup> ) x10 <sup>-3</sup>	9.75	3.27	7.50

Les figures 3.11 à 3.16 montrent que l'absorption capillaire diminue avec la durée de cure humide. On peut constater que l'absorption capillaire à 28 jours de cure présente le plus faible coefficient d'absorption. Plus la durée de cure dans l'eau est longue, plus le coefficient d'absorption d'eau est faible.

Les coefficients d'absorption obtenus après 28 jours de cure représentent 80, 23 et 58% de ceux obtenues à 0 jour de cure de BAP 0, 15 et 25% respectivement. On remarque aussi que l'allongement de la durée de cure est surtout efficace pour les premiers jours de cure entre (1et 3 jours). Pour 3 jours de cure, on a une diminution de 9.1, 53.7 et 12.3% du coefficient d'absorption de 0, 15 et 25% de laitier, respectivement. L'incorporation du



laitier a engendré aussi une légère diminution de l'absorption d'eau pour les BAP de 15 et 25% de laitier. L'absorption capillaire dépend de l'état d'hydratation atteint après un certain temps de conservation dans l'eau.

Salhi et Mezghiche [91] ont montré que la perméabilité à l'eau pour les bétons contenant de ciment avec ajouts de sable de dune et laitier granulé est plus faible que celle de béton de référence.

L'absorption d'eau par capillarité à 28 jours est comparable pour tous les bétons étudiés. A 90 jours, une légère diminution de l'absorption d'eau pour les bétons au laitier est enregistrée, notamment pour le B50 qui présente une valeur du coefficient d'absorption de  $3,05 \text{ kg/mm}^2/\text{h}_{1/2}$  comparée à  $3,23 \text{ kg/mm}^2/\text{h}_{1/2}$  pour le béton B0 [92].

Kockal et Turker [32] ont trouvé que les coefficients de capillarité sont très élevés dans les bétons conservés dans un environnement naturel. Tasdemir [33] a montré que les additions minérales (les cendres volantes (FA), la poudre de grés (PS), la poudre de calcaire (LP) et la fumée de silice (SF)) sont bénéfiques pour l'augmentation de la résistance et la réduction de l'absorption capillaire.

Ibrahim et Abdulhamit [53] ont montré que le changement des valeurs des coefficients de capillarité dépend de la durée et des conditions de cure ainsi que du pourcentage des granulats légers type EPA (expanded perlite aggregate).

Kazim et al. [55] ont indiqué qu'une bonne cure et un mélange pouzzolanique (fumée de silice ou cendres volantes) comme substitution au ciment améliorent la résistivité des BAP vis-à-vis de l'absorption d'eau de manière significative.

Une bonne corrélation a été observée entre la sorptivité et les valeurs de la résistance à la compression; la résistance à la compression des bétons augmente avec l'hydratation et la sorptivité diminue significativement indiquant une microstructure plus dense [55].

Alexander et al. [95] ont trouvé que l'incorporation de 50% de laitier dans un béton avec un rapport E/L de 0,49, diminue le coefficient d'absorption de 9%. Ce résultat est confirmé par d'autres recherches montrant une diminution de l'absorption d'eau par capillarité pour les bétons au laitier, particulièrement pour des taux de laitier supérieurs à 50% [93]. Cette diminution reflète une structure de pores plus raffiné et une diminution de la porosité capillaire, due à la formation de CSH secondaire issu de l'hydratation du laitier [94].

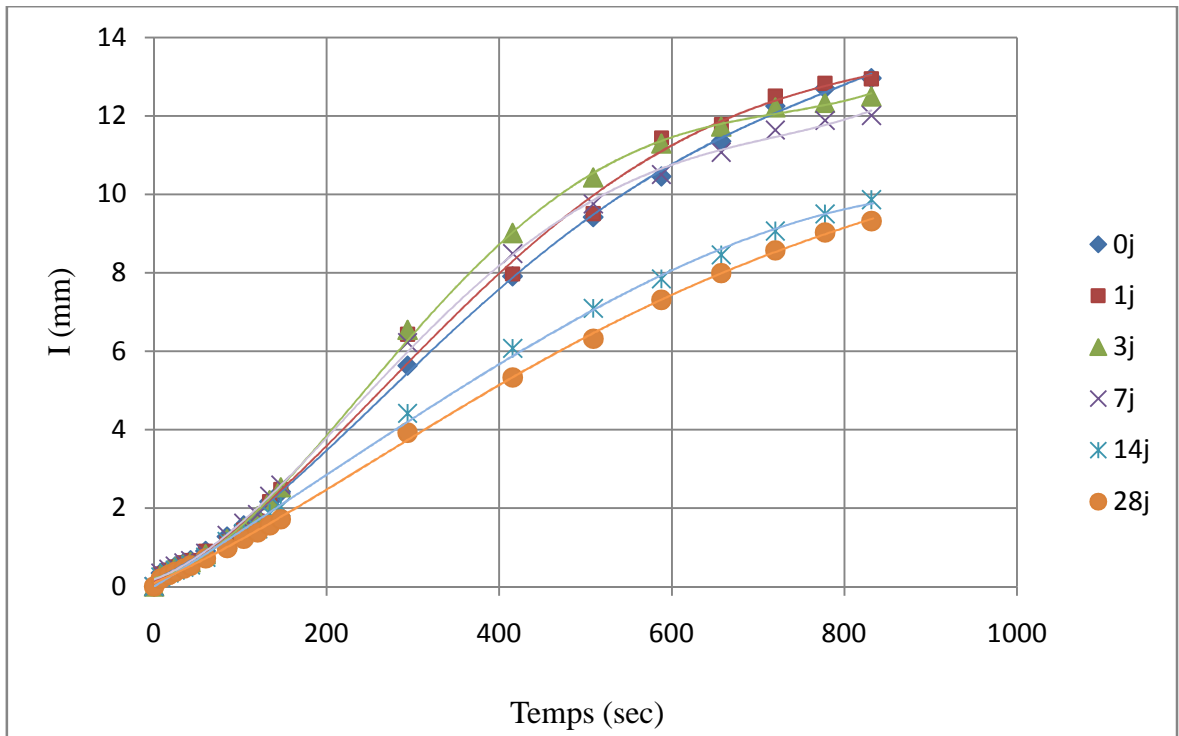


Figure 3.11 : Effet de la durée de cure sur l'absorption capillaire par unité de surface des BAP à base de 0% de laitier.

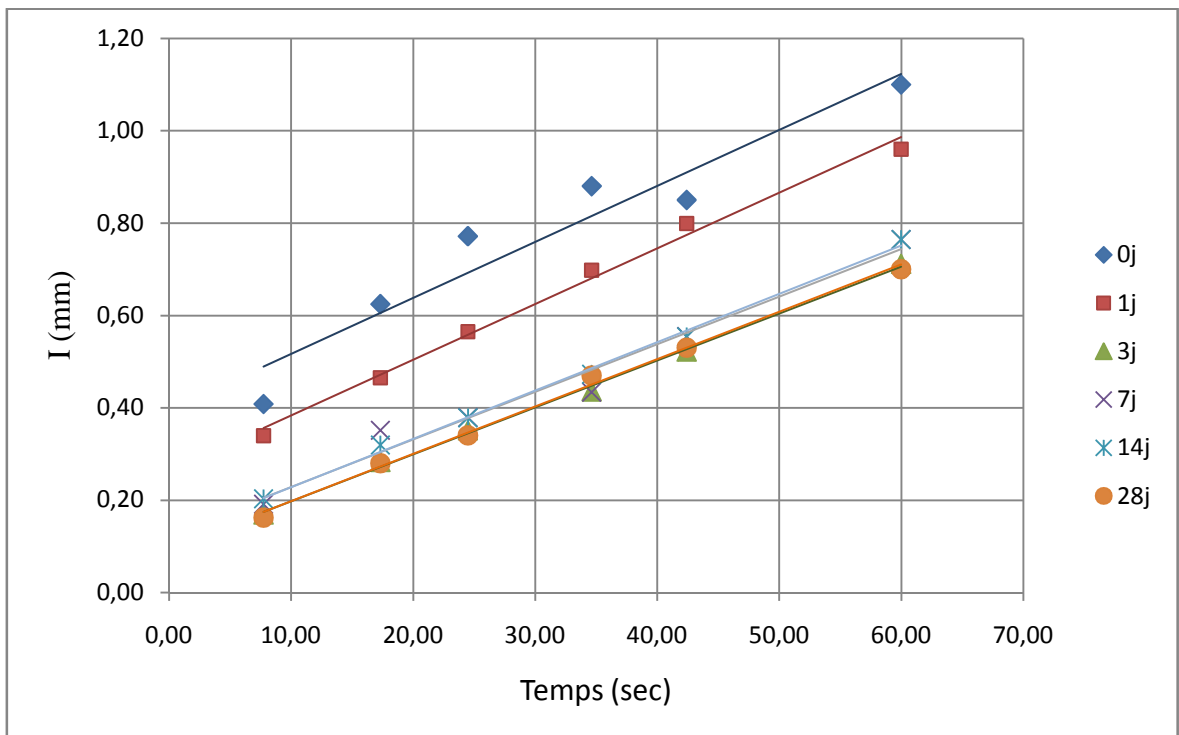


Figure 3.12 : Effet de la durée de cure sur l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 0% de laitier.

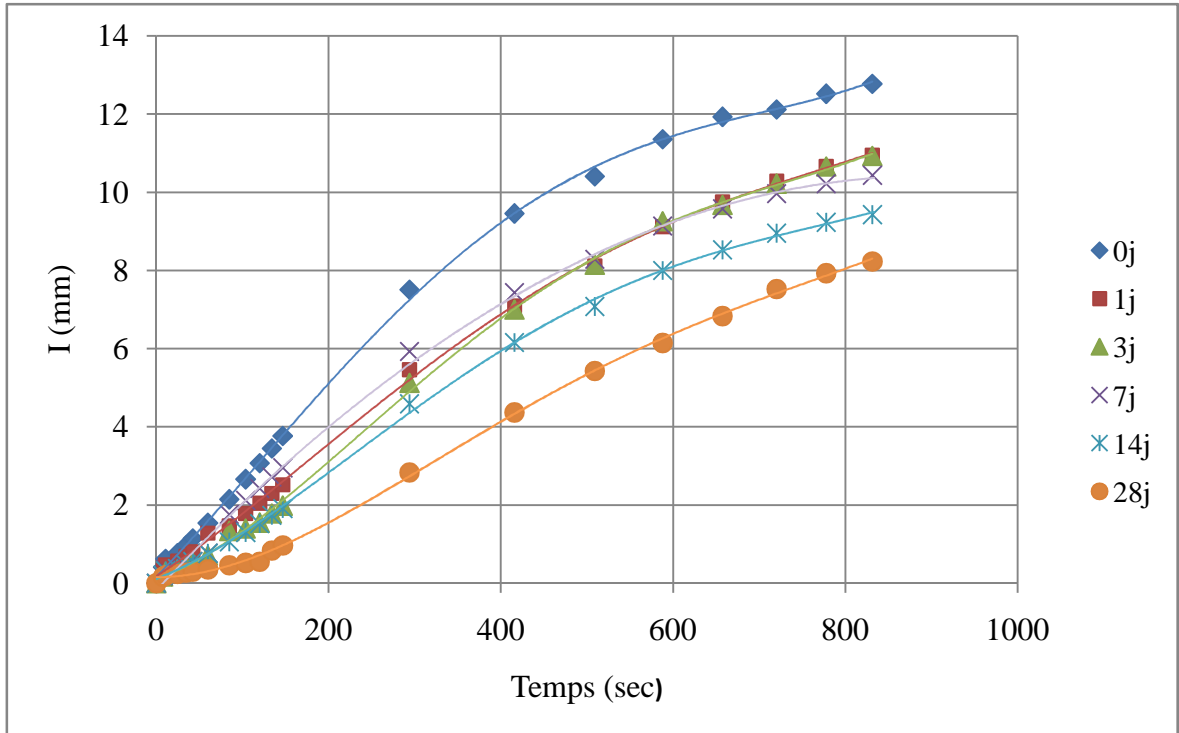


Figure 3.13 : Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des BAP à base de 15% de laitier.

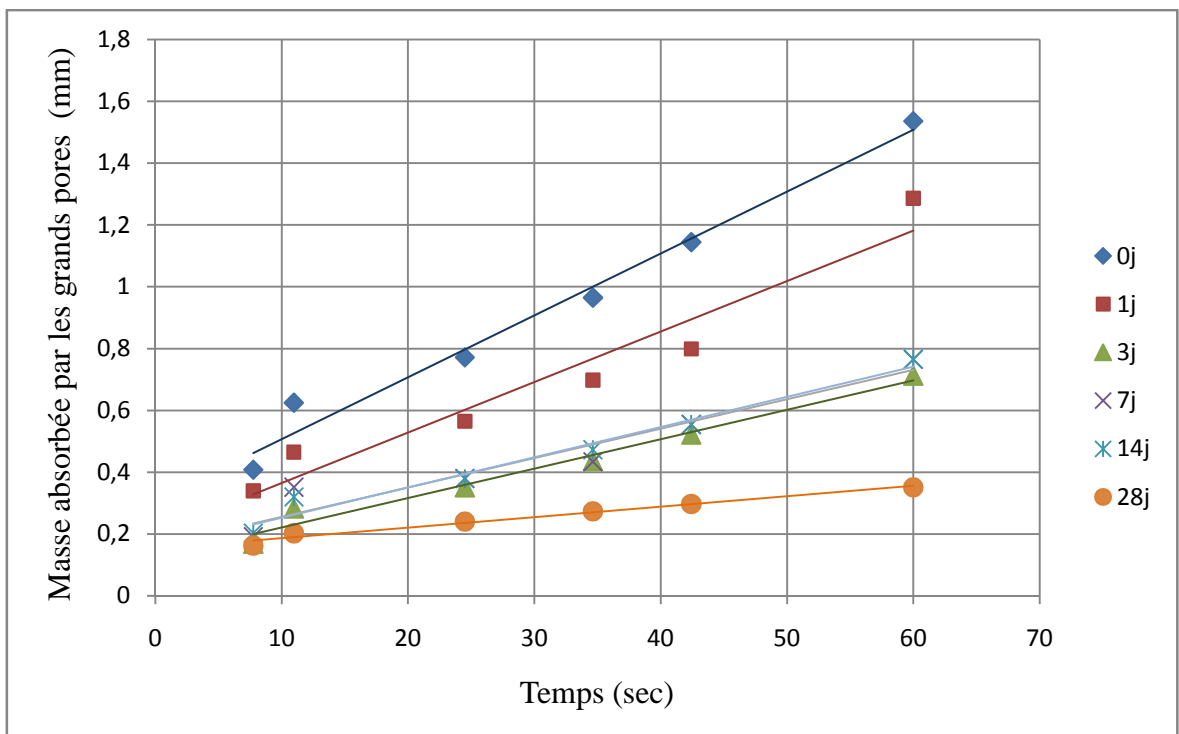


Figure 3.14 : Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 15% de laitier.

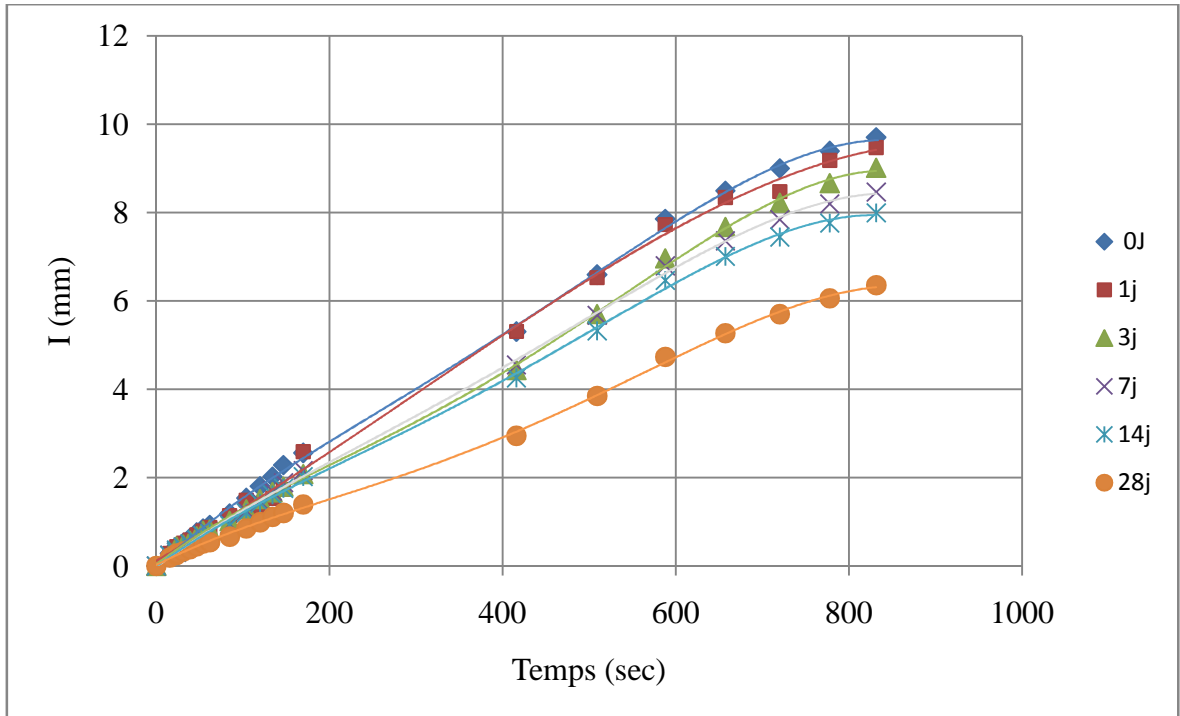


Figure 3.15 : : Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des petits pores des BAP à base de 25% de laitier.

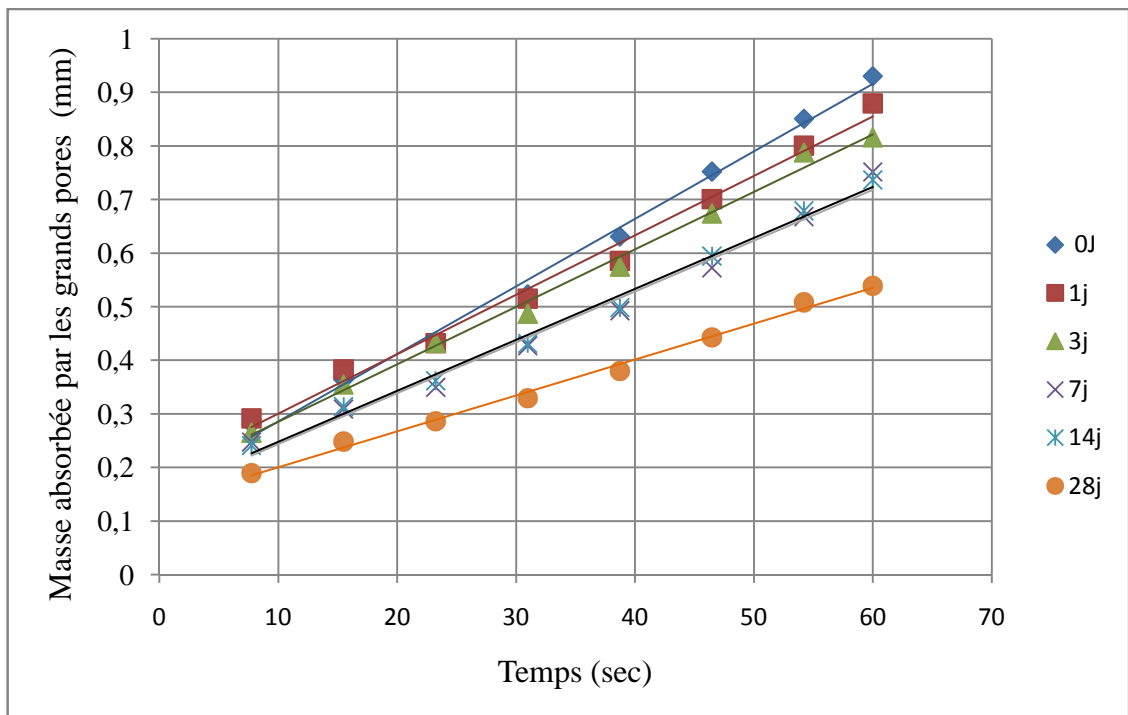


Figure 3.16 : : Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 25% de laitier.

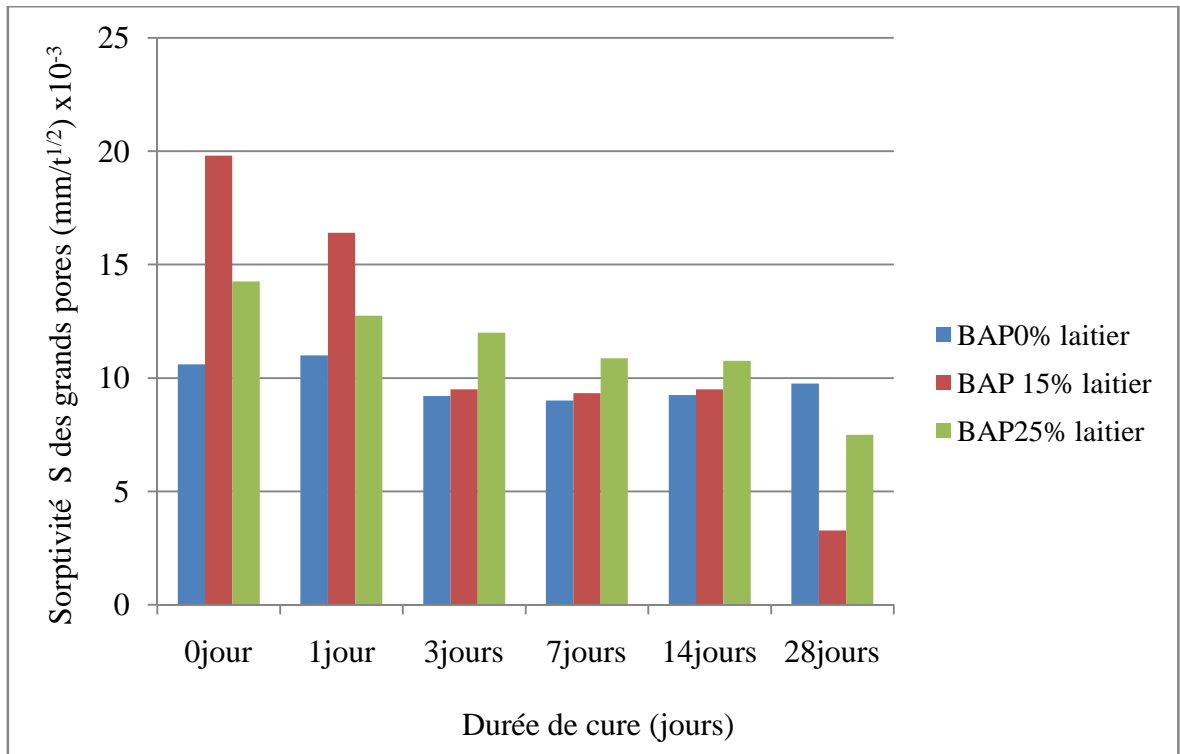


Figure 3.17 : Effet de la durée de cure sur la sorptivité des grands pores des BAP à base de laitier.

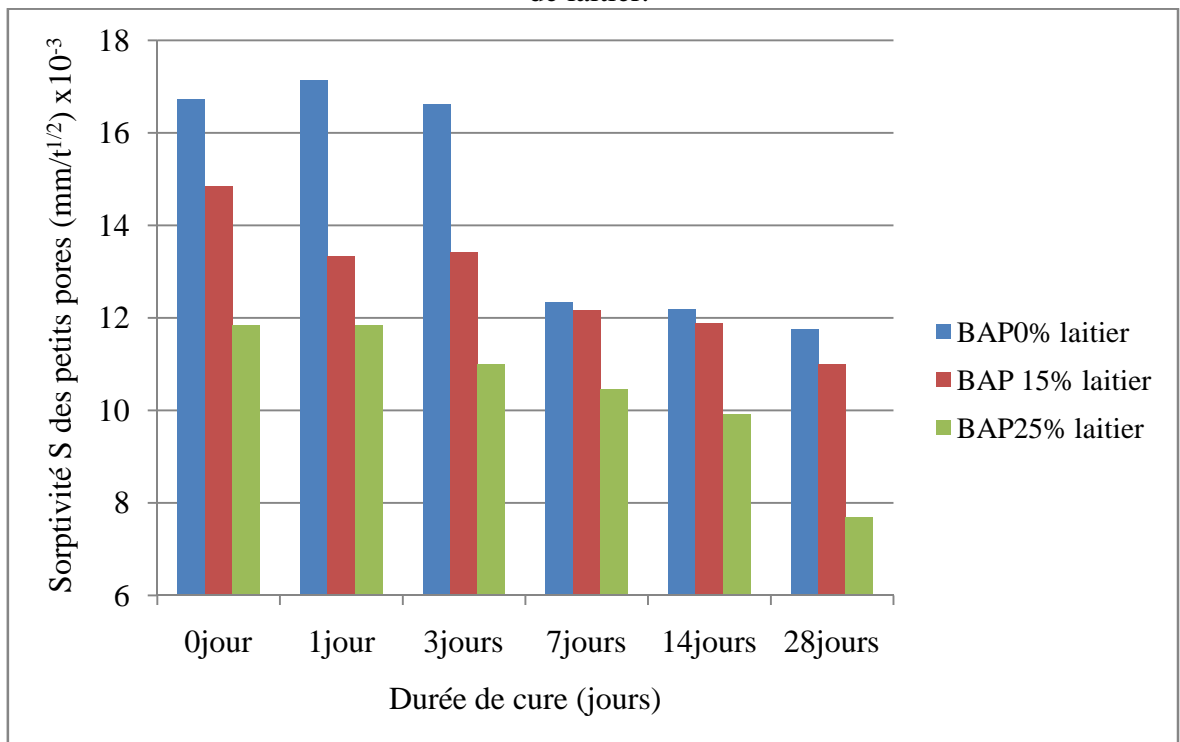


Figure 3.18 : Effet de la durée de cure sur la sorptivité des petits pores des BAP à base de laitier.

### 3.4.3. La perméabilité à l'eau

Les résultats de la perméabilité à l'eau des BAP sont représentés dans le tableau 3.12 et illustrés sur la figure 3.19.

Tableau 3.12 : Perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure

La pénétration d'eau (mm)			
Cure	BAP0% laitier	BAP15% laitier	BAP25% laitier
0 jour	70.71	62.33	52.19
1 jour	62.18	53.84	49.95
3 jours	58.13	47.67	40.70
7 jours	53.20	51.00	43.86
14 jours	50.88	48.19	40.60
28 jours	47.30	44.33	35.47

La figure 3.19 montre que la perméabilité d'eau en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure humide. Les essais de perméabilité à l'eau ont été effectués à 90 jours de durcissement, dont les durées de cures sont 0, 1, 3, 7, 14 et 28 jours, sont ensuite conservés à l'air libre sur la toiture de laboratoire.

On remarque que la profondeur de pénétration de l'eau des BAP diminue avec l'augmentation de l'âge de cure. La profondeur de la perméabilité à l'eau dépend fortement de la durée de cure, plus la durée de cure est faible plus la pénétration d'eau dans le béton est grande.

On remarque que les éprouvettes ont été conservées à l'air libre présentent une augmentation de perméabilité de 33% par rapport à celles maintenues dans la cure pendant 28 jours. Ainsi, après 1 jour de cure, un gain de 12% par rapport à zéro jour de cure est obtenu. Par ailleurs, pour une durée de cure de 1, 3, 7 et 14 jours, la pénétration d'eau dans le béton représente une augmentation de 24, 19, 11 et 7% de celle de 28 jours de cure respectivement. Ceci est dû à l'obturation des pores et diminution de la perméabilité par l'hydratation continue du ciment dans l'eau. Par contre, le climat chaud sert à produire un pourcentage élevé des gros pores et moins uniformes. Les bétons au laitier présentent une

profondeur de pénétration d'eau nettement inférieure à celle du béton de référence sans ajout.

Une diminution de la profondeur de la perméabilité de l'ordre de 9.82 et 23.10 % pour les BAP de 15 et 25% de laitier par rapport au BAP de référence respectivement est observée. On remarque que 25% de laitier présente la perméabilité la plus faible, ce qui confirme les résultats précédents. Ceci peut être expliqué par l'effet positif du laitier à long terme par sa lente hydratation qui se traduit par la diminution de la taille des pores de la structure, et réduit de ce fait la perméabilité des BAP au laitier.

Al-Khaiat et Haque [34] ont montré que la profondeur de pénétration de l'eau, qui indique la perméabilité, s'est avérée beaucoup plus sensible à la cure initiale des bétons. Alors que la résistance à la compression des éprouvettes exposées à des conditions ambiantes au bord de la mer était plus élevée que celles conservées dans l'eau, leur pénétration de l'eau est presque doublée lorsque la cure initiale était de 1 jour. Ces résultats indiquent l'importance de la cure initiale des structures côtières.

Jooss et Reinhardt [30] ont observé que la perméabilité augmente de 13 à 62% lorsque la température est augmentée de 20 à 50 °C et 3 à 55% pour une augmentation de 80 °C.

Amrane et Kenai [20] ont observé que les perméabilités à 60 jours des bétons aux laitiers et du béton témoin sont très comparables. Le laitier Algérien a une faible réactivité mais il aura le temps de remplir les pores et réduit leur perméabilité.

El-Amiri [2] a trouvé une amélioration de la perméabilité de l'ordre de 40 à 75%, pour un béton avec 30% de laitier, par rapport au béton sans laitier, après 6 mois de cure humide. Selon Iyoda et al [90], à court terme, en absence de cure humide, un béton avec 55% de laitier présente une perméabilité à l'eau élevée. Cependant, une cure humide de 7 à 28 jours conduit à une amélioration de la perméabilité à ce dernier.

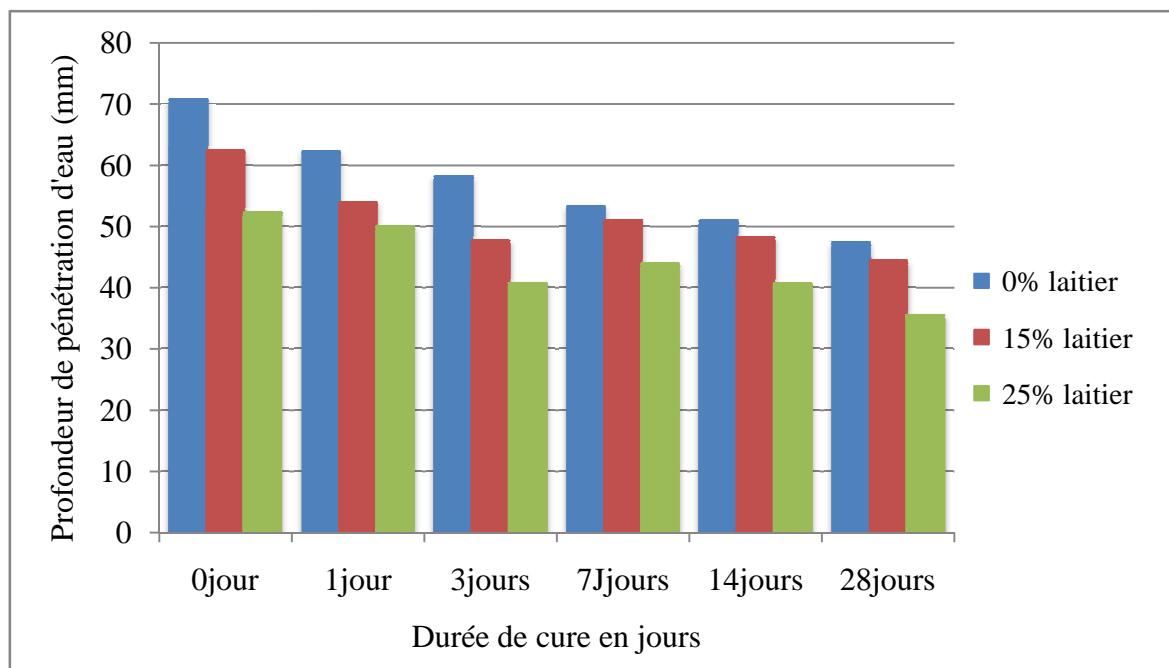


Figure 3.19 : Effet de la durée de cure sur la profondeur de pénétration d'eau des BAP à base de laitier.

La relation entre la résistance à la compression et la profondeur de pénétration d'eau est illustrée sur la figure 3.20. On observe une augmentation de la résistance à la compression avec la diminution de la profondeur de pénétration d'eau. Les coefficients de corrélations sont 0.903, 0.703 et 0.797 avec un pourcentage de laitier 0,15 et 25% respectivement. Ceci peut être expliqué par le fait que la perméabilité à l'eau dépend non seulement de la résistance à la compression mais aussi de la surface spécifique, de la dimension et de la tortuosité avec laquelle une structure poreuse est connectée et la longueur moyenne relative du parcours d'une particule de fluide d'une extrémité à l'autre d'un corps poreux.

Berhane [57] rapporte qu'au-dessus d'une certaine limite, un taux élevé d'évaporation diminuera la maniabilité et peut entraîner une fissuration par retrait plastique, qui à son tour engendrera des effets négatifs sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.



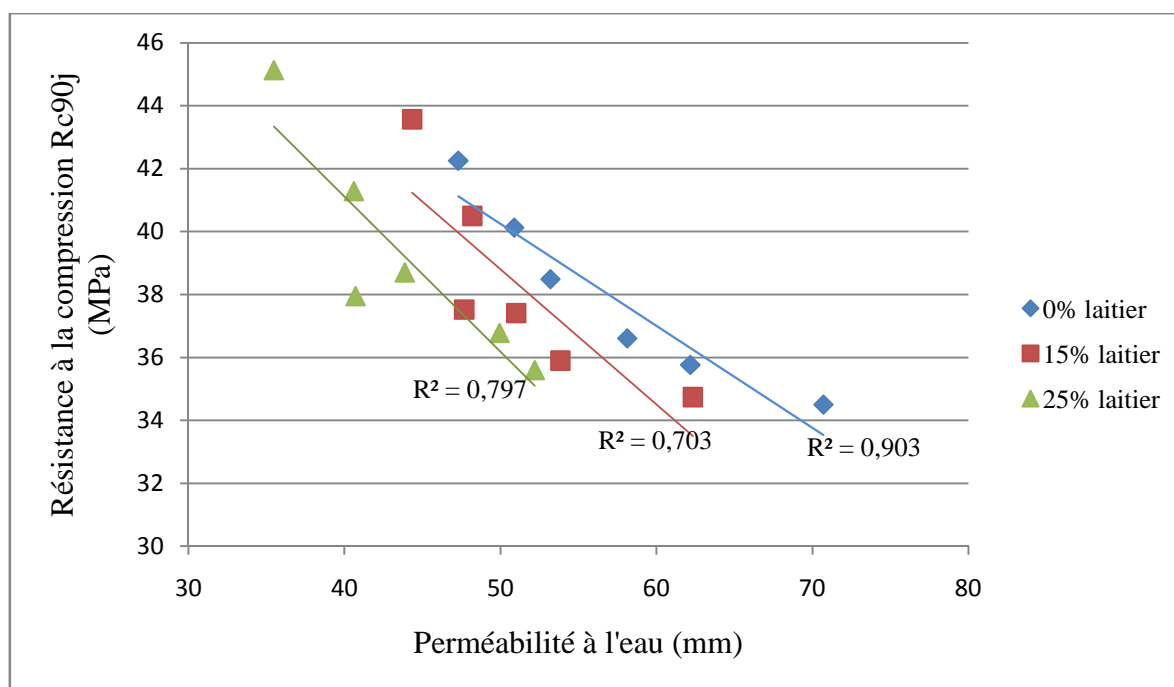


Figure 3.20 : Corrélation entre la résistance à la compression et la perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure.

#### 3.4.4 Porosité ouverte accessible à l'eau

Les résultats de la porosité ouverte sont présentés dans le tableau 3.13 et illustré sur la figure 3.21.

Tableau 3.13 : Porosité ouverte  $P_w$  en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure

Cure	BAP0% laitier	BAP15% laitier	BAP25% laitier
	$P_w$	$P_w$	$P_w$
0 jour	16,41	14,79	14,77
1 jour	15,89	14,29	14,01
3 jours	15,78	14,14	13,98
7 jours	15,21	13,55	13,18
14 jours	15,16	12,31	12,05
28 jours	14,64	12,23	11,72

La figure 3.21 illustre les résultats de la porosité ouverte en fonction de la durée de cure et la teneur en laitier. Les bétons contenant du laitier présentent une porosité plus faible que celle du béton de référence. Cela est peut être expliqué au raffinement des pores capillaires de la matrice cimentaire du béton durci avec l'avancement d'hydratation. A titre d'exemple, on a remarqué qu'une substitution de 15 et 25% de laitier engendre une diminution moyenne de la porosité de 1.96% et 2.23% respectivement

On remarque aussi que la porosité diminue en fonction de la durée de cure. Les bétons qui n'ont reçu aucune cure après démoulage présentent la plus mauvaise performance en termes de porosité c.-à-d. le pourcentage le plus élevé de porosité. Les BAP avec 15% et 25 % de laitier présentent une porosité assez comparable, avec une légère augmentation de porosité pour le BAP avec 15% de laitier.

La porosité diminue de 16.41% à 14.64%, de 14.79% à 12.63% et de 14.77% à 11.72% lorsque la durée de cure augmente de 0 à 28 jours pour une teneur de laitier respectivement de 0, 15 et 25%.

Ramezaniapour et Malhotra [12] ont constaté que les bétons qui n'ont reçu aucune cure après démoulage montrent la plus mauvaise performance en termes de développement de résistance, de porosité et de résistance à la pénétration des ions du chlore. La cure humide continue du béton est indispensable pour obtenir une résistance élevée, une faible porosité et une résistance plus élevée à la pénétration des ions de chlore.

Le mortier témoin montre la plus faible porosité totale, suivie par le mortier de 50% et 25% de laitier, mortier de fumée de silice, mortier HVFA et enfin mortier à base de 25% de cendres volantes. Les effets bénéfiques de l'utilisation du laitier, des cendres volantes et de fumées de silice ne sont pas reflétés par les résultats ci-dessus, parce que les réactions d'hydratation dans le cas du laitier, et les réactions pouzzolanique dans le cas des cendres volantes et des fumées de silice procèdent à une vitesse relativement lente [12].

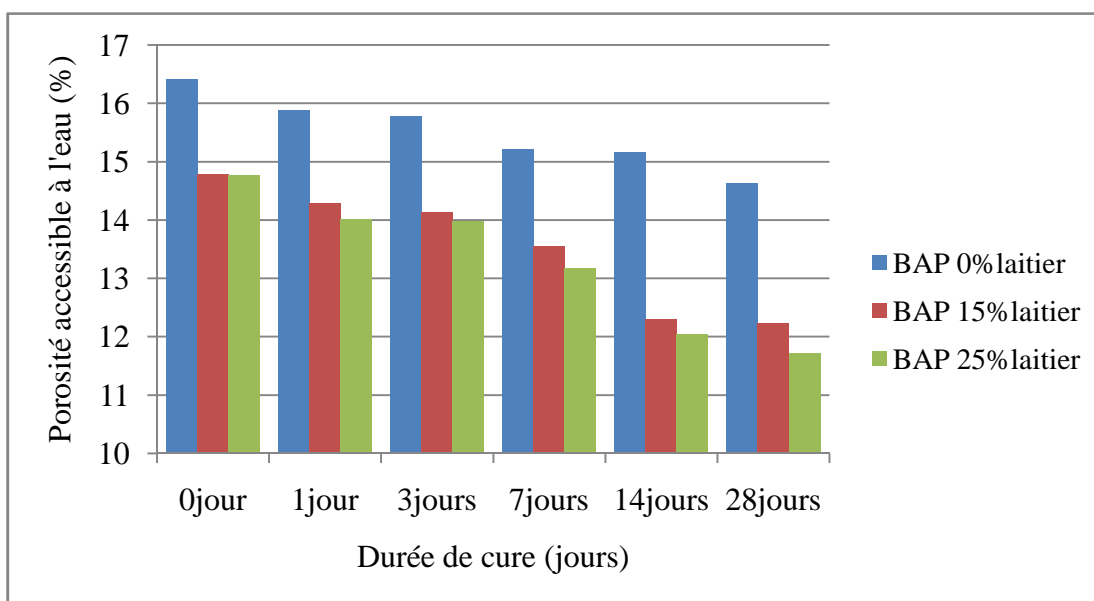


Figure 3.21 : Effet de la durée de cure sur la Porosité accessible à l'eau des BAP à base de laitier.

La figure 3.22 montre la relation entre la résistance à la compression à 90 jours et la porosité accessible des BAP à base de laitier. Cette corrélation confirme que la résistance mécanique est en relation avec leur porosité accessible à l'eau (la pente des droites de tendance est identique ainsi que leur coefficient de corrélation). Pour cela, on peut dire que la porosité est une fonction inverse de la résistance à la compression; plus la porosité augmente plus la résistance diminue.

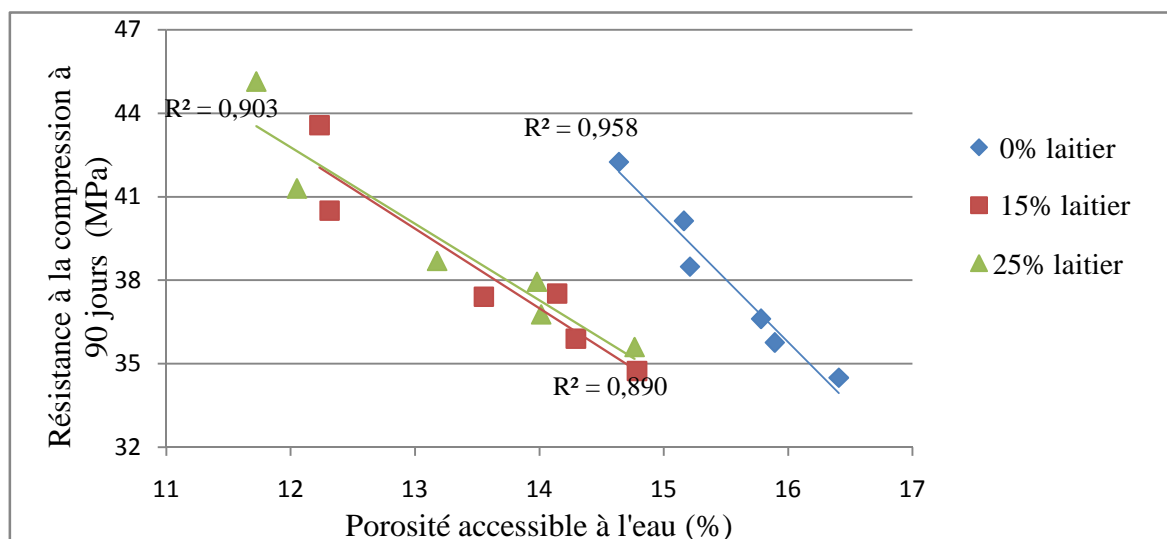


Figure 3.22 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité accessible à l'eau.

### 3.5 Conclusion

Les résultats obtenue sur le BAP en climat chaud, ont révélés que :

- Les essais de mini cône et V-funnel sur mortier nous ont permis de déterminer le dosage minimal de E/L et le dosage optimal en superplastifiant.
- Les essais rhéologiques nous ont permis de déterminer le dosage optimal de taux de substitution de laitier par le ciment.
- La substitution partielle du ciment par le laitier d'El-Hadjar a modifié certains paramètres à l'état frais et durcis du BAP par rapport au BAP de référence (sans ajout), et l'incorporation de 25% de laitier semble le dosage optimal.
- L'effet de la cure humide sur l'ensemble des propriétés physicomécaniques étudiées dans ce chapitre est favorable à long terme.
- L'augmentation de la substitution de laitier de 15 et 25% par le ciment conduit à une résistance à 28 jours qui se rapproche de celle du béton sans ajout. Néanmoins, à 90 jours, une légère augmentation est observée.
- La durabilité du béton à savoir l'absorption d'eau par capillarité, la perméabilité à l'eau et la porosité diminuent avec l'augmentation du taux de substitution du laitier à 90 jours.

## Conclusion générale

Ce mémoire contribue à la compréhension des phénomènes de durabilité des BAP à base de laitier d'El-Hadjar dans un climat chaud. L'optimisation de la formulation du BAP a été obtenue en se basant sur la méthode d'Okamura.

Les essais ont été réalisés durant l'été. L'étude expérimentale nous amène à proposer les conclusions suivantes :

- Les résultats de mini cône et de V-funnel effectués sur mortier, ont pour objectif de déterminer le dosage optimal en superplastifiant. Au vu de ses résultats, le dosage nécessaire pour la formulation de BAP est 1.8%.
- L'augmentation du dosage en superplastifiant et la teneur en laitier diminue la stabilité du BAP.
- L'incorporation de laitier de haut fourneau en tant qu'additions minérales dans les BAP influe d'une manière significative sur les propriétés du BAP à l'état frais et la durabilité à l'état durcis à long terme. Le taux de substitution de 25% du ciment par le laitier correspond au dosage optimal.
- La résistance à la compression maximale a été obtenue pour un taux de substitution de laitier par ciment de 25% et les meilleures valeurs de porosité, perméabilité et l'absorption capillaire ont été obtenues à ce pourcentage.
- L'augmentation de la substitution de laitier de 15 et 25% par le ciment conduit à une résistance à 28 jours qui se rapproche de celle du ciment sans ajout, quelque soit la durée de cure.
- Les mesures de perméabilité sur des échantillons de béton sous une température élevées ont mis en évidence l'effet de temps chaud sur la perméabilité des BAP.
- Les essais de durabilité sur les BAP à base de laitier ont mis en évidence les effets de la microstructure. D'après ces résultats, nous avons remarqué que la porosité du béton sans ajout est un peu plus importante que celle du béton avec ajout. Par ailleurs, l'augmentation de la teneur en laitier dans le béton conduit à une augmentation de la compacité de ce dernier.

- La conservation des éprouvettes à l'air libre contribue à des modifications physico-chimiques qui conduisent à une augmentation de la porosité, perméabilité à l'eau et l'absorption capillaire par rapport à celle conservées dans l'eau douce. Ces deux paramètres sont liés à l'accroissement de la taille des pores capillaires, mais également à la détérioration de la matrice cimentaire et à l'apparition de microfissuration.
- Une bonne corrélation a été obtenue entre la résistance à la compression et la porosité, perméabilité à l'eau et l'absorption capillaire.

### **Recommandations et perspectives**

Cette étude a été limitée par le temps et les moyens disponibles. Nous proposons de la compléter par d'autres investigations sur :

- La résistance à la compression aux jeunes âges dans les différentes conditions de cure.
- L'influence de la température ou l'humidité seule sur le béton pour estimer quel paramètre a le plus grand effet.
- L'effet du climat chaud sur le retrait des BAP.
- L'étude de l'effet du retard de l'application de la cure sur les propriétés mécaniques et la durabilité des BAP.

- [1] Mouret M., « Contribution a l'étude des phénomènes d'altération des résistances des bétons confectionnés par temps chaud», Thèse de Doctorat de l'université de Sabatier, 1997.
- [2] El Amiri A., Durability of concrete in hot Climate, PhD thesis, Leeds University, England, 1988.
- [3] Mamillan, Minard et Zanghellini « bétonnage par temps chaud- par temps froid. Connaissance actuelles et recommandations», Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, n°476, pp 78-83, 1989.
- [4] Venuat M., «le bétonnage par temps chaud et dans les pays chauds». Conference au LPEE, Casablanca, Paris CERILH, page 26.
- [5] Mather B., «he warmer the concrete, the faster the cement hydrates », concrete international,vol.82,6, 1985, pp931-932.
- [6] Soroka I et Ravina D., «Hot Weather Concreting with Admixtures», Cement and Concrete Composites 20 (1998) 129-136.
- [7] AFNOR, NF P15.431 ; l'essai de Vicat , Normes Françaises, Paris, 1994.
- [8] Venuat M., « la pratique des ciments, mortiers et bétons », (2eme édition), tomes 1et 2, édition du moniteur ,1989.
- [9] Ahmadi B.H., «Initial and final setting time of concrete in hot weather», Materials and Structures & Matériaux et Constructions, Vol. 33, October 2000, pp 511-514.
- [10] Mouret M., Bascoul A. ,et escadeillas G., « Drops in concrete strength in summer related to the aggregate temperature »,cement and concrete research ,vol.27,n°3,pp 345-357.
- [11] Soroka I., « concrete In hot environnements», E& FN Spon, pp249, 1993.
- [12] Ramezani pour A. A. et Malhotra V. M., «Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride-Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume», Cement &Concrete Composites 17 ,1995, pp125-133.
- [13] Samir N. Shoukry., Gergis W. William. , Brian Downie. ,and Mourad Y. Riad , « Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete », Construction and Building Materials 25 , pp 688–696 ,2011.
- [14] Bakir N., Issaad A. et Beddar M., « Influence du climat chaud et de la cure sur les propriétés du mortier », 1st International Conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), 2009.

- [15] OMER Z. CEBECI., « Strength of concrete in warm and dry environment », 1987, 20, 270-272.
- [16] SAMIR H. AL-ANI, MOKDAD A. K. AL-ZAIWARY, «The effect of curing period and curing delay on concrete in hot weather», 1988, 21,pp 205-212.
- [17] Balendran R.V., Martin-Buades W.H., «The influence of high temperature curing on the compressive, tensile and flexural strength of pulverized fuel ash concrete», 2000,pp 415-423.
- [18] Lachmat L. et Kenai S., « effet du type et de la durée de cure sur les propriétés du béton en climat chaud », Proceeding du Séminaire international sur la Qualité du béton en climat chaud, Ghardaïa, 1994, pp30-44.
- [19] Kriker A., « effet de la cure sure la résistance mécanique des bétons aux laitiers d'El-Hadjar », Proceeding du Séminaire international sur la Qualité du béton en climat chaud, Ghardaïa, 1994, pp45-52.
- [20] Amrane A. et Kenai S., «Propriétés mecaniques et Durabilité du béton au laitier en climat chaud », Proceeding du Séminaire international sur la Qualité du béton en climat chaud, Ghardaïa, 1994, pp106-122.
- [21] Hadj Sadok A., Kenai S. et Courard L., « Perméabilité au gaz et aux ions chlore des mortiers à base de laitier de faible hydraulicité », INVACO2, Séminaire International, Innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction N° : 10-189.
- [22] Baroghel B. ; «Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, analyses et résultats»; Thèse de Doctorat, LCPC, Paris, France ; 1994.
- [23] Ismail M., « Etude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucléaires) », Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 2006.
- [24] Ho D.W.S, Lewis R.K., « the water sorptivity of concretes: the influence of constituents under continuous curing», Durability of building materials,4,1987,pp241-252.
- [25] Stéphan A., «Durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat d'INSA de Toulouse, 2004.



- [26] Perraton D., Aitcin P.C., et Carles-Gibergues A., « Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque », Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 1999, vol 221, pp 69-78.
- [27] Hocine S., « influence de type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de Doctorat de INSA de Rennes, 2010.
- [28] Waheeb A. Al-Khaja., « Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes », Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 1, pp. 9-13, 1997.
- [29] Bastidas-Arteaga E., Chateauneuf A., Sanchez-Silva M., Bressolette Ph., and Schoefs F., « Influence of weather and global warming in chloride ingress into concrete: A stochastic approach », 2010, 238–249.
- [30] Martin J. and Hans W. R., « Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature », 2002, 1497–1504.
- [31] L.PAGE C., SHORT N. R., EL TARRAS A.; « Diffusion of Chloride ion in hardened cement pastes », Concrete Research, Vol. 11, pp. 395-406, 1981.
- [32] Niyazi U.K and Fikret T, « Effect of environmental conditions on the properties of concretes with different cement types », 2007, pp 634–645.
- [33] Hocine S., « influence de type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de Doctorat de INSA de Rennes, 2010
- [34] Al-Khaiat H. and Haque M.N., « Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete », Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 6, pp. 859–866, 1998.
- [35] Thanh Son NGUYEN., « Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires », Thèse de Doctorat de INSA Toulouse, 2006.
- [36] ADAM N., « Chloride attack of reinforced concrete: an overview », Materials and Structures, Vol. 28, pp. 63-70, 1995.
- [37] TAYLOR H.F.W.; Cement chemistry; Thomas Telford edition; Reprinted 2003, 2004.

- [38] Norme NF EN I 97-1, «Centre d'information sur le ciment et ses applications ; «La normalisation française des ciments», 2001.
- [39] BIGAS J.P.; «La diffusion des ions chlorés dans les mortiers »; Thèse de doctorat ; Génie civil ; INSA de Toulouse, 1994.
- [40] GALLE C., «Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry. A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying», *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1467-1477, 2001.
- [41] R.F. FELDMAN; «Significance of porosity measurement on blended cement performance»; 1er Inter. Conf. on user of fly ash, silica fume, slag and other mineral byproducts in concrete, Montebello, V.M. Malhotra Ed. ; ACI, SP 79, Vol. 1, pp. 415-433, 1983.
- [42] BEJAOU S.; « Etude du comportement des bétons soumis à des sollicitations climatiques de type gel/dégel », Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 2000.
- [43] Baron J., et Ollivier J.P., «Les bétons – Bases et données pour leur formulation», Editions Eyrolles, 1996.
- [44] Petersson O. and Billberg P. Van B. K., «A model for self-compacting concrete», In *Proceedings of International RILEM Conference on production and workability of concrete*. RILEM, 1999.
- [45] OH S.G., Noguchi T., and Tomosawa F., «Towards mix design for rheology of self compacting concrete», *First Int .Symposium on SCC* , Stockholm, Edited by Sharendahl and Petersson , RILEM publications PRO7, Cachan pp.361-372, 1999.
- [46] Hanaa FARES., « Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés a une température élevée », Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2009.
- [47] AFGC « Recommandations pour l'emploi des bétons auto plaçants», document scientifique et technique, 2008.
- [48] Maher EL BARRAK., « Contribution a l'étude de l'aptitude l'écoulement des bétons autoplaçants a l'état frais », Thèse de Doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2005.

- [49] Association Française de Génie Civil., «Bétons autoplaçants -Recommandations provisoires», 2000.
- [50] Fiches Techniques, Tome2, « les Bétons : Formulation, Fabrication et mise en œuvre », centre d'information sur le ciment et ses applications, pp 108-119.
- [51] Ghafoori. N et Diawara.H, « Influence of temperature on fresh performance of self-consolidating concrete», 2010, pp946-955.
- [52] Heba A. M., « Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions», 2011, 2,pp 79–86.
- [53] Turkmen. A et Kantarc. A, «Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete», .Indian Journal of Engineering & Materials, Vol13, pp247-252, 2006.
- [54] Hui Zhao., Wei Sun., Xiaoming Wu., and Bo Gao., « Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concrete », 2012, pp194–200.
- [55] Turk. K, Caliskan. S, et Yazicioglu. S, « Capillary water absorption of self compacting concrete under different curing conditions»,2007,pp 365-372.
- [56] Abdi B., « la durabilité des bétons autoplaçants destinés à la réparation des infrastructures », Mémoire de Maitrise des sciences Appliquées, Spécialité : génie civil, Sherbrooke Québec, Canada, 2005.
- [57] BERHANE. Z, « The behaviour of concrete in hot climates», Materials and Structures, 1992, 25, pp 157 162.
- [58] Satish C., «Waste materials used in concrete manufacturing», NOYES, New Jersey, USA, 1997.
- [59] Neville M., «Propriétés des bétons», EYROLLES, Paris, 2000.
- [60] NF P 15-301., «Liants hydrauliques : Ciments courants ; composition, spécifications et critères de conformité», AFNOR, Paris, 1994.
- [61] NF EN 1008., «Eau de gâchage pour bétons -Spécifications 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», P18-211, Juillet 2003.

[62] Diederich. P, « Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton », Thèse de Doctorat à l'Université Toulouse III - Paul Sabatier ; 2010.

[63] Boukendakdji O., « Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires », Thèse de Doctorat de l'université de Blida, 2010.

[64] Aiad I., Abd El-Aleem S. and El-Didamony H., « Effect of delaying addition of some concrete admixtures on the rheological properties of cement pastes », *Cement and Concrete Research*, 2002, vol 32, pp. 1839–1843.

[65] Domone P.L.J. and Jin J., «Properties of mortar for Self-Compacting Concrete», *Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, RILEM Proceedings PRO 7, 1999, Paris, pp. 109–120.

[66] Nawa T., Izumi T., and Edamatsu Y. «State- of- the-art- report on materials and design of self compacting concrete» *Proc of Int. Workshop on Self-compacting Concrete*», ed K. Ozawa and K. Ouchi, Kochi University of Technology, Japan, August 1998, pp. 166-190.

[67] Norme française, P 18-406., «Béton-essai de compression», AFNOR, Paris, 1981.

[68] ASTM C1585 – 11, «Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes», 2012.

[69] DIN 1048, «Testing method for concrete: determination of the depth of penetration of water under pressure», 2000.

[70] AFPC-AFREM, « Méthode recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », *Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM*, « Durabilité des bétons », Toulouse, 1997.

[71] Harifidy Ranaivomanana., « Transfer dans les milieux poreux réactifs non saturées : application à la cicatrisation de fissure dans les matériaux cimentaires par carbonatation », Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, 2010.

- [72] «Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete», EFNARC, 2002.
- [73] Domone P.L., Chai H.W. and Jin J. «Optimum mix proportioning of self-compacting concrete», Proceeding on international conference on 'innovation in concrete structures: design and construction, University of Dundee, Ed. Dhir RK and Jones MR, Thomas Telford, London, 1999, pp. 277-285.
- [74] BETHMONT S., «Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants», Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005, 159 pages.
- [75] Boukendakdji O., Kenai S., E.H. Kadri , Rouis F., « Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete», *Construction and Building Materials* 23 ,2009 ,2593–2598.
- [76] Aarre T., Domone P., «Reference concretes for evaluation of test methods for SCC», In: *Proceedings of 3rd RILEM international symposium on self compacting concrete*, Reykjavik, Iceland; 2003. p. 495–505.
- [77] Her-Yung Wang., and Chih-Chung Lin., « A study of fresh and engineering properties of self-compacting high slag concrete (SCHSC) », *Construction and Building Materials* 42 , 2013, p132–136.
- [78] Uysal. M, and Yilmaz,K « Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete», *Cement & Concrete Composites* 33, 2011, p771–776.
- [79] Boukendakdji, O., Kadri.E.H. and Kenai,S.« Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete», *Cement & Concrete Composites* 34 ,2012, p583–590.
- [80] 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.*, vol. 24, 2010, pp. 1878-1887.
- [81] Mehmet Gesoglu. , Erhan Guneyisi. , Erdogan Ozbay b., « 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* 23 ,2009, p 1847–1854.
- [82] Mehmet Gesoglu. , Erhan Guneyisi. , Mustafa E. Kocabag. , Veysel Bayram .,and Kasim Mermerdas, « Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made

with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash» ,Construction and Building Materials 37 ,2012, p160–170.

[83] Eva Vejmelkova. , Martin Keppert. , Stefania Grzeszczyk. , Bartłomiej Skalin ski. , and Robert ernity., «Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag », Construction and Building Materials 25 ,2011, p1325–1331.

[84] Dinakar P., Kartik Reddy M., Mudit Sharma., « Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash», Materials and Design 46, 2013, p609–616.

[85] Mucteba Uysal.,and Mansur Sumer., «Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures», Construction and Building Materials 25, 2011; p4112–4120.

[86] Rahmat Madandoust, S. Yasin Mousavi., «Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin», Construction and Building Materials 35 , 2012,p 752–760.

[87] Miao Liu., « Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash», Construction and Building Materials 24, 2010, p 1245–1252.

[88] Mucteba Uysal. , Kemalettin Yilmaz , Metin Ipek , «The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete», Construction and Building Materials 27 ,2012,p263–270.

[89] Mucteba Uysal., «The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete », Construction and Building Materials 37, 2012, p 533–540.

[90] Iyoda T., Sagawa Y., «The effect of curing period on the durability of concrete using blast-furnace slag blended cement», The 3rd ACF International Conference, ACF/VCA 2008.

[91] K. Salhi et B. Mezghiche , «Etude de durabilité de mortier et beton contenant de ciment avec ajouts de laitier granulé et sable de dune», SBEIDCO- 1st International

Conférence on Sustainable Built Environnement infrastructures in Developing Countries, NSET Oran(Algeria), Octobre 12-14,2009.

[92] Hadj Sadok,A. « Comportement des mortiers et bétons à base de ciments au laitier d'el hadjar dans des milieux agressifs», Thèse de doctorat Université Saad Dahlab De Blida, Blida, 2010.

[93]Guneyisi E., Gesoglu M., A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag, *Materials and Structure*, vol.12, pp225-230, 2008.

[94] Jiang SP., Grandet J., Evolution comparée des porosités des mortiers de ciment au laitier et des mortiers de ciment portland, *Cement and Concrete Research*, vol.19, pp 487-495, 1989.

[95]Alexander MG., Magee BJ., Durability performance of concrete containing condensed silica fume, *Cement and Concrete Research*, vol.29, pp 917-922, 1999.

[96] Li Z. and Ding Z. «Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag», *Cement and Concrete Research*, 2003, vol 33, pp. 579-584.

[97] Bilim C. , Karahan O , Atis,C.D and Ilkentapar,S. , «Influence of admixtures on the properties of alkali activated slag mortars subjected to different curing conditions» , *Materials and Design* 44 ,2013, 540–547.

## Annexe A

### Exemple de calcul de la composition du mortier

#### A.1 Les Données

Pour un volume du mortier de  $V=1.3$  l (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment :  $\rho_C = 3040 \text{ kg/m}^3$
- Sable :  $\rho_S = 2584 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant :  $\rho_{Sp} = 1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau :  $\rho_E = 1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable  $A_b = 0.64\%$

On fixe le rapport Sable/Mortier  $S/M = 0.50$

On fixe le rapport (par poids)  $E/C = 0.45$  ou (par volume)  $E/C = 1.368$ .

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de :  $\%Sp = 1,8\%$  du poids de ciment (ou poudres).

#### A.2 Calcul d'humidité du sable

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse  $M_1 = 300$  g (par exemple), on le met dans l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 8 minutes puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse  $M_2 = 295$  g 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 :

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

#### A.3 Calcul des quantités de chaque constituant

##### A.3.1 Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment  $C\%$ :

$$\%C_{vol} = \frac{(1 - S/M)}{(1 + E/C_{\text{par volume}})} * 100$$

La quantité de ciment  $C$  en kg:



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

### A.3.2 Le Sable

La quantité du sable en kg est S :

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

### A.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<sub>1</sub>, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E<sub>2</sub> (30% 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<sub>vol</sub>

$$\%E_{\text{vol}} = \frac{(1 - S/M) \times 100 \times E/C_{\text{par volume}}}{(1 + E/C_{\text{par volume}})}$$

La quantité d'eau globale E en litre :

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

Eau1      E<sub>1</sub> = E × 0.70

Eau2      E<sub>2</sub> = E × 0.30

## Annexe B

### Exemple de calcul de la composition du béton

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

#### B.1 Les Données

Pour un volume de béton de  $V=30$  litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
  - ❖ Masse volumique apparente du gravier :  $\rho_G = 1487 \text{ kg/m}^3$
  - ❖ Masse volumique absolue du gravier :  $\rho_{AG} = 2707 \text{ kg/m}^3$
  - ❖ Masse volumique absolue du sable :  $\rho_S = 2584 \text{ kg/m}^3$
  - ❖ Masse volumique absolue du ciment :  $\rho_C = 3040 \text{ kg/m}^3$
- Les coefficients d'absorption :
  - ❖ Coefficient d'absorption du sable :  $AbS = 0.64\%$
  - ❖ Coefficient d'absorption du gravier :  $AbG = 0,5\%$
- Le rapport Sable/Mortier :  $S/M = 0.50$
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage :  $A=1\%$  du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de  $E/C_{\text{volume}}=1.368$  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) :  $\%Sp= 1,8\%$  du poids de ciment, le MEDAFLOW30 est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau).

#### B.2 Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse  $M_1$  et un échantillon de gravier de masse  $M'_1$  et on les met dans l'étuve réglée à  $105^\circ\text{C}$  pour une durée de 6 minutes pour le gravier et une durée de 8 minutes pour le sable, puis on pèse  $M_2$  et  $M'_2$  les masses respectives du gravier et du sable.

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

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

### B.3 Calcul des différents composants

#### B.3.1 Gravier

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

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

#### B.3.2 Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume  $V$  de béton (S) :

Le pourcentage du gravier  $G$  dans le béton :

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

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

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

Le pourcentage du sable  $S$  dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S / M}{100}$$

Quantité du sable  $S$  en (kg) pour un volume  $V$  de béton :

$$S(\text{kg}) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left( 1 + \frac{\mu_s - A_{bS}}{100} \right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition.

#### B.3.3 Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$\%P = \%M - \%S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$\%C = \frac{1}{1 + E / C_{volume}} \times \%P$$

La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton :

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

#### B.3.4 Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton  $Sp$  (kg/m<sup>3</sup>)

$$Sp(kg / m^3) = \frac{\%Sp}{100} \times \%C \times \rho_C \times 10$$

La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

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

#### B.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 et l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$\%E = \frac{E / C_{volume}}{1 + E / C_{volume}} \times \%P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau ( $e$ ) doit être extraite :

L'eau contenue dans le sable :  $e_1$

$$e_1(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left( \frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le gravier :  $e_2$

$$e_2(kg) = \frac{G(kg / m^3) \times V}{1000} \left( \frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le superplastifiant :  $e_3$

$$e_3 = \frac{Sp(kg) \times 80}{100}$$

L'eau à extraire  $e$  :

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

D'où la quantité d'eau globale  $E$  en (kg) pour un volume  $V$  de béton :

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

Avec :

Eau1                     $E_1(\text{kg}) = 0.70 \times E$

Eau2                     $E_2(\text{kg}) = 0.30 \times E$