

UNIVERSITE DE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des Science de l'Ingénieur

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Construction

EFFET DU LAITIER SUR LE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU BETON AUTOPLAÇANT

Par

Omar Kouider Djelloul

Devant le jury composé de :

M. ABED	Professeur, USD Blida	Président
M.GHRICI	Maitre de conférences A, U.de Chlef	Examineur
A.BOUKNI	Maitre de conférences A, USD Blida	Examineur
B. MENADI	Maitre de conférences A, USD Blida	Rapporteur
S. KENAI	Professeur, USD Blida	Co-Rapporteur

Blida, Janvier 2012

RÉSUMÉ

Un béton autoplaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration. Afin d'atteindre une grande fluidité de BAP et d'empêcher la ségrégation et le ressuage, le dosage élevé en additions minérales est une nécessité pour une bonne conception de BAP. L'objectif de ce travail est étudié l'effet de l'addition du laitier d'El-Hadjar à différentes pourcentages (10, 15, 20, 25%) dans le ciment et, pour trois finesses (3500, 4200, 5000 cm²/g). La méthode Okamura à été utilisé pour formuler le béton autoplaçant. Toutes les compositions ont été fabriquées avec rapport eau/liant fixe (E/L=0,40), un même rapport G/S=1, rapport S/M à 0,50 constante et d'après les résultats d'optimisation sur le mortier le dosage en superplastifiant est 1,8% du poids du ciment. Les essais menés dans le programme expérimental qui pour déterminer les caractéristiques rhéologiques du BAP sont : essais d'étalement au cône d'Abrams, d'écoulement à l'entonnoir en V, d'écoulement à la boîte en U, essai à la boîte en L, essai à la Couronne J et de stabilité au tamis. Les résultats des essais expérimentaux ont montré que la quantité et la finesse du laitier influent considérablement sur les propriétés rhéologiques du BAP. Les BAP contenant un taux de substitution d'environ 15% du ciment par du laitier (SSB : 3500 cm²/g) représente un effet favorable sur les caractéristiques rhéologiques. L'utilisation le laitier avec des finesses 4200 et 5000 cm²/g nécessite l'ajout de plus grandes quantités d'eau ou de superplastifiant pour atteindre les propriétés essentielles (la capacité au remplissage, la capacité de passage, la résistance à la ségrégation, rhéologie) pour les mélanges de BAP.

Mots clés : Béton Autoplaçant, Laitier, Superplastifiant, Ouvrabilité, Rhéologie, Finesse.

ABSTRACT

A self-compacting concrete (SCC) is a fluid concrete, very deformable, homogeneous, stable and can set up by gravity and without the use of any means of vibration. In order to achieve a greater fluidity of SCC and prevent segregation and bleeding, the high dosage in mineral additions is a necessity for good design of SCC. The objective of this work is the studies of effect of slag of El-Hadjar to different percentages (10, 15, 20, 25%) in cement, with three different fineness (3500, 4200, 5000 cm^2/g). The method Okamura was used for making self-compacting concrete. All compositions were made with fixed water ratio/binder ($W/b = 0.40$), the same report/ratio $G/S=1$, report/ratio S/M with 0.50 constant and according to the results of optimization on the mortar proportioning while superplastifiant is 1.8% of the weight of cement. Tests conducted in the experimental program for determining the rheological characteristics of the SCC are: Slump flow, V funnel flow, flow in the box U, test for L- box, J-ring test and Sieve stability test. The results of the experimental show that the quantity and fineness of the slag in the BAP significantly affect the rheological properties. The SCC containing a partial substitution rate of approximately 15% of cement by slag (BSS: 3500 cm^2/g) gives a favorable effect on the rheological characteristics. The use of slag with 4200 and 5000 cm^2/g fineness requires the addition of greater quantities of water or superplasticizer to achieve the essential properties (the ability to fill the capacity of way, resistance to segregation, rheology) for mixtures of SCC.

Key words: Self-Consolidating Concrete, Slag, Superplasticizer, Workability, Rheology, Fineness.

ملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا هي خرسانة مرنة، متجانسة ومستقرة بنسبة وزنها ودون استخدام أي وسيلة من الاهتزاز. ومن أجل تحقيق قدر أكبر من المرونة للخرسانة المرصوصة ذاتيا ومنع التفرقة لمكوناتها والإفرازات المائية، يجب على الخليط أن يحتوي على نسبة عالية من المواد المعدنية الرقيقة جدا في الخليط لتصميم جيد. إن الهدف من هذا العمل هو دراسة مادة فضلات الأفران من أفران مصنع الحديد والصلب. ومن أجل هذا قمنا بتغيير من جهة نسبة فضلات الأفران 10، 15، 20 و 25 % كبديل للإسمنت ، ومن جهة أخرى نعومة الخبث المحضر 3500، 4200، 5000 سم² /غ، ولتحضير الخلطات طبقنا طريقة أوكامورا. كل التراكيب حضرت بنسب ثابتة منها : نسبة الماء / الرابط = 0.4 ، ونفس الرمل / الحصى = 1، مونة / الحصى = 0.50. والنتائج التقييمية على المونة أثبتت أن نسبة اللدنات الممتازة هي 1.8 % من وزن الاسمنت ، و التجارب التي أجريت في البرنامج التجريبي لتحديد الخصائص الريولوجية للخرسانة المرصوصة ذاتيا هي : تجربة نشر مخروط ابرامز، وتدفق القمع V و U ، اختبار تدفق J - L والاستقرار من خلال منخل. إن نتائج الاختبارات التجريبية أظهرت أن كمية ونعومة خبث الأفران تؤثر تأثيرا كبيرا على خصائص الريولوجية للخرسانة المرصوصة ذاتيا. حيث أن احتواء الخرسانة المرصوصة ذاتيا على نسبة الاستبدال حوالي 15 % من الاسمنت من قبل خبث الأفران (نعومة الخبث 3500 سم²/غ) تؤثر تأثيرا إيجابيا على الخصائص الريولوجية. رأينا أيضا أن من اجل إنتاج الخرسانة المرصوصة ذاتيا ذات النعومة 4200 و 5000 سم²/غ للخبث تتطلب إضافة كميات أكبر من الماء أو الملدنات الممتازة المساعدة على المرونة لتحقيق الخصائص الأساسية (القدرة على التعبئة، القدرة على الانتقال، مقاومة الفصل العنصري، الريولوجيا) لمخاليط الخرسانة المرصوصة ذاتيا.

الكلمات المفاتيح : الخرسانة المرصوصة ذاتيا، فضلات الأفران ، الملدن الممتاز المساعد على المرونة، قابلية التشغيل ، الريولوجيا , النعومة.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu Dieux le miséricordieux qui nous a donné du courage et de la volonté avec lesquels ce mémoire a été achevé.

Mes gratitudes vont aussi à notre encadreur Monsieur Menadi Belkacem, Maitre de conférences à l'université de Blida, ici j'écris ce que je devais dire avant d'écrire : merci beaucoup monsieur de nous avoir guidés et suivis. Je ne saurai oublier son aide efficace lors de la réalisation de la partie expérimentale, qu'il soit profondément remercié.

Un grand merci à notre Co-encadreur Monsieur Kenai Said, Professeur à l'université de Blida pour son aide, sa disponibilité, et pour la confiance qu'elle faisait en nous, et également pour sa gentillesse et sa modestie. Je le remercie pour le temps qui a consacré pour corriger ce mémoire.

Je remercie aussi les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant de juger notre travail :

- ◆ Monsieur M. ABED, Professeur à l'université de Blida, président du jury ;
- ◆ Monsieur M. GHRICI, Maitre de conférences à l'université de Chlef, examinateur ;
- ◆ Monsieur A. BOUKNI, Maitre de Conférences à l'université de Blida, examinateur.

Je tiens à adresser toute ma gratitude à M^r Boukendakdji othmane, Maitre de conférences à Universitaire de Médéa, mes chaleureux remerciements vont vers cette personne, pour sa gentillesse, ses conseils, ses orientations pris pour mener à bien ce travail.

Je tiens à adresser toute ma gratitude à Hadj Sadok Ahmed, Docteur à l'Ecole National de L'Hydraulique de Blida, pour sa disponibilité, ses conseils et ses orientations au cours de notre travail expérimentale.

Je remercie le directeur de la cimenterie Monsieur Abib Zineddine de Lafarge pour l'approvisionnement en ciment CRS.

Mes sincères remerciements vont également à toute l'équipe de GRANITEX, qui a contribué à la réalisation de ce travail par la fourniture des superplastifiants (MEDAFLOW 30).

Je voudrais remercier également le chef de département de chimie industrielle à l'Université de Saad Dahleb pour l'accueil et la mise en disposition du broyeur pour le laitier.

Je tiens à remercier la direction du laboratoire de la cimenterie de Meftah pour la réception et la mesure de la finesse du laitier.

Je souhaiterais également remercier Monsieur Fortas Abdelkader, laborantin de laboratoire de la Géomatériaux du département de Génie Civil de l'Université de Blida pour leur aide précieuse et leur soutien permanent.

Je tiens également à remercier tous les enseignants de département de Génie civil qui ont contribué à ma formation, commençant par celui qui m'avait fait m'asseoir pour recevoir le premier cours et finissant par celui qui me fait me lever pour exposer mon travail.

Je remercie tous mes collègues de travail, Allali Mohamed ELamine, Azzaz Rahmani Abdessamed, Bouzanna Mehdi, Korri Mohamed, Debbih Amina, Hammat Siham, pour leur aide et leur gentillesse spontanée et pour tous les moments que nous avons traversé ensemble sans oublier de remercier tous mes amis de promotion.

Mes vifs remerciements du tout mon cœur ma famille, A mes chers frères, ma sœur, ma fiancée et en particulier mes parents qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable. Merci aussi à tous mes amis

Je terminerai en remerciant du tout ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES

Résumé	2
Remerciements.....	5
Table des matières	7
Liste des figures et des tableaux	11
Liste des symboles et des abréviations	17
Introduction générale	20
Chapitre 1 : Le Béton Auto-Plaçant – Etude bibliographique	
1.1 Généralités	23
1.2 Définition des bétons autoplaçants	23
1.3 Historique des bétons autoplaçants	23
1.4 Spécificité de la composition des BAP	24
1.5 Avantages du BAP (techniques et socio-économiques)	26
1.6 Constituants des bétons autoplaçants	26
1.6.1 Le ciments	27
1.6.2 Les ajouts minéraux	27
1.6.3 Les Granulats	28
1.6.4 L'eau de gâchage	28
1.6.5 Adjuvants des bétons	28
1.7 La formulation des bétons autoplaçants	29
1.7.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers	30
1.7.2 Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte	30
1.7.3 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire	31
1.7.4 Méthode basée sur un plan d'expérience	32
1.7.5 L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE	32
1.8 Principe et application des approches	32

1.8.1	Approche Japonaise ou la méthode générale	32
1.8.2	Approche Suédoise (CBI)	34
1.8.3	Approche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC	35
1.9	Caractérisation du BPA à l'état frais	35
1.9.1	Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP	35
1.9.1.1	Notions fondamentales de rhéologie	35
1.9.1.2	Lois du comportement rhéologique des BAP	37
1.9.1.3	Facteurs influençant la rhéologie des BAP	39
1.10	Propriétés des BAP à l'état durci	41
1.10.1	Résistance à la compression	42
1.10.2	Résistance à la traction	44
1.10.3	Module d'élasticité	45
1.11	Retrait	46
1.11.1	Retrait thermique	46
1.11.2	Retrait endogène	46
1.11.3	Retrait plastique	48
1.11.4	Retrait de séchage (dessiccation)	50
1.12	Déformation sous charge (fluage)	50
1.13	Durabilité	53
1.13.1	Perméabilité aux gaz	53
1.13.2	Diffusion des ions chlore	55
1.13.3	Absorption capillaire	59
1.13.4	Carbonatation	61
1.13.5	Résistance aux sulfates et aux acides	63
1.13.6	Résistance des bétons à la lixiviation	64
1.13.7	Les cycles de gel-dégel	65
1.13.8	Résistance au feu	68
1.14	Conclusion	73

Chapitre 2 : Matériaux et Méthodes d'essais

2.1 Introduction	74
2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés	74
2.2.1 Ciment	74
2.2.2 Le laitier	75
2.2.3 Les Granulats	78
2.2.3.1 Le sable	78
2.2.3.2 Le gravier	79
2.2.4 L'eau de gâchage	79
2.2.5 Le Superplastifiant	80
2.3 Formulations adoptées	80
2.3.1 Formulation du mortier	81
2.3.1.1 Confection des mortiers	82
2.3.2 Formulation du BAP de Référence	83
2.3.2.1 Confection des BAP	83
2.3.3 Substitution du ciment par du laitier	85
2.4 Essais de caractérisations technologiques des BAP	85
2.4.1 Essais relatifs au Mortier à l'état frais	85
2.4.1.1 Essai d'Étalement au Mini-Cône	85
2.4.1.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)	86
2.4.2 Essais relatifs au BAP à l'état frais	86
2.4.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Flow test)	87
2.4.2.2 Essai à l'Entonnoir en V (V-Funnel test)....	89
2.4.2.3 Essai à la Couronne J (J-Ring test)	90
2.4.2.4 Essai à la boîte en L (L-Box test)	92
2.4.2.5 Essai à la boîte en U (U-Box test)	94
2.4.2.6 Essai de résistance à la ségrégation par tamisage	95
2.5 Récapitulatif du programme des essais réalisés	96

Chapitre 3 : Résultats Expérimentaux et Discussion

3.1 Introduction	98
3.2 Optimisation du rapport Superplastifiant/Liant (S/L)....	98
3.2.1 Effet le dosage de superplastifiant sur l'ouvrabilité du mortier autoplaçant	99
3.3 Effet du taux de substitution du laitier sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais	103
3.3.1 Mesures d'étalement et du temps T_{50} au cône d'Abrams	106
3.3.2 Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)	109
3.3.3 Mesures du rapport H_2/H_1 , les temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de l'essai de la Boîte en L (L-Box)....	111
3.3.4 Mesures d'étalement, temps T_{50J} et différence de hauteur B_J au cône d'Abrams en présence du J-Ring	115
3.3.5 Mesure de la hauteur de remplissage à la boîte en U (U-Box)	118
3.3.6 Mesure de résistance à la ségrégation par tamisage	119
3.4 Effet de la finesse du laitier (effet physique) sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais	120
3.4.1 Mesure d'étalement et du temps T_{50} au cône d'Abrams	122
3.4.2 Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)	126
3.4.3 Mesures du rapport H_2/H_1 , les temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de l'essai de la Boîte en L (L-Box)	128
3.4.4 Mesures d'étalement, temps T_{50J} et différence de hauteur B_J au cône d'Abrams en présence du J-Ring	131
3.4.5 Mesure de la hauteur de remplissage à la boîte en U (U-Box)	135
3.4.6 Mesure de résistance à la ségrégation par tamisage	136
3.5 Conclusion	137
Conclusion Générale et Perspectives	138
Référence	140
Annexe A: Exemple de calcul de la composition du mortier	
Annexe B : Exemple de calcul de la composition du béton	

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Liste des Figures :

Figure 1.1 :	Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP	25
Figure 1.2 :	Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment	29
Figure 1.3 :	Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2)	31
Figure 1.4 :	Courbes de comportement rhéologique pour les corps fluides	37
Figure 1.5 :	Différents Comportements d'écoulement	38
Figure 1.6 :	Exemples de comportement rhéologique pour différents types de béton	39
Figure 1.7 :	Évolution de la résistance à la compression en fonction du temps	42
Figure 1.8 :	Variation de la résistance à la compression avec l'âge pour le BAP	43
Figure 1.9 :	Courbe de résistance à la compression à 28 jours (MPa)	44
Figure 1.10 :	Influence du laitier sur la résistance en flexion	45
Figure 1.11 :	Retraits endogène et totale d'un BV et de deux BAP de résistance 60 MPa	47
Figure 1.12 :	Influence F /C sur le retrait endogène	47
Figure 1.13 :	Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure	49
Figure 1.14 :	Retrait plastique des formules de BAP et de BO dérivés	49
Figure 1.15 :	Flèche instantanée : BAP1 et BV	51
Figure 1.16 :	Fluage total : BAP1 et BV	51

Figure 1.17 :	Flèche instantanée : BAP1 et BAPF1	52
Figure 1.18 :	Fluage total : BAP1 et BAPF1	52
Figure 1.19 :	Coefficient de fluage moyen en fonction de l'âge après chargement	52
Figure 1.20 :	Perméabilité apparente à l'oxygène des bétons étudiés	54
Figure 1.21 :	Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence de chlorures	55
Figure 1.22 :	Coefficient de migration des ions chlore	56
Figure 1.23 :	Valeurs de perméabilité des ions chlore des bétons étudiés	57
Figure 1.24 :	Coefficient efficace de diffusion de chlorure des bétons étudiés	57
Figure 1.25 :	Pénétration d'ions chlorure à 28 et 91 jours pour les différents mélanges des BAP	58
Figure 1.26 :	Résultats l'absorption d'eau par capillarité des bétons étudiés	59
Figure 1.27 :	Coefficient d'absorption capillaire (à 24 h) des bétons étudiés	60
Figure 1.28 :	Influence des cendres volantes sur l'absorptivité	60
Figure 1.29 :	Profondeur de carbonatation à l'âge de 42,5 mois	62
Figure 1.30 :	Profondeur de carbonatation des bétons étudiés	63
Figure 1.31 :	Profondeur carbonatée des bétons étudiés	65
Figure 1.32 :	Influence de la saturation du béton sur sa résistance au gel	66
Figure 1.33 :	Résultats d'essais de résistance au gel-dégel d'un BAP (essai d'écaillage)	67
Figure 1.34 :	Perte de masse de béton en fonction de la température	69
Figure 1.35 :	Porosité en fonction de la température	70
Figure 1.36 :	Perméabilité normalisée par rapport à 200 °C	71

Figure 1.37 :	Perméabilité normalisée par rapport aux bétons sans FPP	72
Figure 1.38 :	Perméabilité intrinsèque en fonction de la température	72
Figure 2.1 :	Le laitier granulé de haut fourneau utilisé, (a) avant broyage, (b) après broyage	75
Figure 2.2 :	Broyeur à boulet utilisé	76
Figure 2.3 :	Finesse du laitier en fonction du temps de broyage	77
Figure 2.4 :	Courbes Granulométriques du sable et des graviers	79
Figure 2.5 :	Séquence de malaxage du mortier	82
Figure 2.6 :	Malaxeur à mortier	82
Figure 2.7 :	Malaxeur pour béton	83
Figure 2.8 :	Séquence de malaxage du béton autoplaçant	84
Figure 2.9 :	Essai d'Étalement pour Mortier	85
Figure 2.10 :	Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier	86
Figure 2.11 :	Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)	87
Figure 2.12 :	Mesure du diamètre d'étalement	88
Figure 2.13 :	Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)	89
Figure 2.14 :	Dimension du J-ring et position pour mesure de différence d'hauteurs	91
Figure 2.15 :	Mesure d'étalement en présence du J-Ring	91
Figure 2.16 :	Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring	92
Figure 2.17 :	Essai de la boîte en L	93
Figure 2.18 :	Essai à la boîte en U	94

Figure 2.19 :	Essai de résistance à la ségrégation au tamis	95
Figure 2.20 :	Diagramme des essais réalisés sur le mortier et le béton à l'état frais	97
Figure 3.1 :	Etalement en fonction du dosage en superplastifiant	100
Figure 3.2 :	L'étalement du mortier (Sp/P = 2,2%)	100
Figure 3.3 :	L'étalement du mortier (Sp/P = 1,8%)	101
Figure 3.4 :	Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant	102
Figure 3.5 :	Etalement en fonction de la teneur en laitier	107
Figure 3.6 :	Temps d'écoulement T_{50} en fonction de la teneur en laitier	109
Figure 3.7 :	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V en fonction de la teneur en laitier	110
Figure 3.8 :	Rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en laitier	113
Figure 3.9 :	Temps d'écoulement T_{20} en fonction de la teneur en laitier	114
Figure 3.10 :	Temps d'écoulement T_{40} en fonction de la teneur en laitier	114
Figure 3.11 :	Etalement avec et sans J-Ring en fonction de la teneur en laitier	116
Figure 3.12 :	Temps d'écoulement avec et sans J-Ring T_{50j} en fonction de la teneur en laitier	117
Figure 3.13 :	Différence de hauteurs B_j en fonction de la teneur en laitier	118
Figure 3.14 :	Hauteur de remplissage à la boîte en U en fonction de la teneur en laitier	119
Figure 3.15 :	Résistance à la ségrégation au tamis en fonction de la teneur en laitier	120
Figure 3.16 :	Etalement en fonction de la teneur en laitier et sa finesse	123

Figure 3.17 :	Temps d'écoulement T_{50} en fonction de la teneur en laitier et sa finesse	125
Figure 3.18 :	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V en fonction de la teneur en laitier et sa finesse	127
Figure 3.19 :	Rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en laitier et sa finesse	129
Figure 3.20 :	Temps d'écoulement T_{20} en fonction de la teneur en laitier et sa finesse	130
Figure 3.21 :	Temps d'écoulement T_{40} en fonction de la teneur en laitier et sa finesse	130
Figure 3.22 :	Etalement avec et sans J-Ring en fonction de la teneur en laitier et sa finesse (3500, 4200, 5000 cm^2/g)	132
Figure 3.23 :	T_{50} avec et sans J-Ring T_{50j} en fonction de la teneur en laitier et sa finesse (3000, 4200, 5000 cm^2/g)	133
Figure 3.24 :	Différence de hauteurs B_j en fonction de la teneur en laitier et sa finesse	134
Figure 3.25 :	Hauteur de remplissage à la boîte en U en fonction de la teneur en laitier et sa finesse	135
Figure 3.26 :	Résistance à la ségrégation au tamis en fonction de la teneur en laitier et sa finesse	136

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 :	Essais permettant la détermination des paramètres rhéologiques des BAP	38
Tableau 1.2 :	Résultats de coefficient de perméabilité à l'oxygène	54

Tableau 1.3 :	Résultats d'essai de carbonatation	62
Tableau 1.4 :	Résistance au gel en terme de perte de masse (kg/m ²)	67
Tableau 1.5 :	Evolution de la porosité	69
Tableau 1.6 :	Evolution de la perméabilité de BAP	70
Tableau 2.1 :	Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEMI 42.5	74
Tableau 2.2 :	Propriétés physique et mécanique de ciment utilisé	75
Tableau 2.3 :	L'analyse chimique de laitier d'El Hadjar	76
Tableau 2.4 :	Indice d'Activité hydraulique du laitier granulé	78
Tableau 2.5 :	Caractéristiques physique de gravier utilisé	79
Tableau 2.6 :	Classification des BAP selon domaine d'utilisation	88
Tableau 3.1 :	Composition des mortiers pour différentes valeurs de Sp/P	99
Tableau 3.2 :	Valeur d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant	101
Tableau 3.3 :	Valeur de temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant	101
Tableau 3.4 :	Composition des BAP étudiés	104
Tableau 3.5 :	Valeur préconisées pour les essais (EFNARC) du BAP	104
Tableau 3.6 :	Résultats d'essai d'ouvrabilité des BAP à l'état frais	105
Tableau 3.7 :	Résultats de cône d'Abrams de BAP	108
Tableau 3.8 :	Résultats d'essai d'ouvrabilité des BAP à l'état frais (SSB : 4200 cm ² /g)	121
Tableau 3.9 :	Résultats d'essai d'ouvrabilité des BAP à l'état frais (SSB : 5000 cm ² /g)	122

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

A	Quantité d'air (m^3)
A_{bs}	Coefficient d'absorption du sable
A_{bG}	Coefficient d'absorption du gravier
AFGC	Association Française de Génie Civil
BAN	Béton autonivelant
BAP	Béton autoplaçant
B_J	Différence d'hauteur de béton au J-Ring
C	Ciment
$Ca CO_3$	Carbonate de calcium
$Ca(OH)_2$	Portlandite
CBI	Cement och Betong Institutet
CO_2	Dioxyde de carbone
CEM I 42.5	Ciment portland ordinaire de Classe 42,5
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
C+A	Ciment+Addition
D_{max}	Diamètre maximal des granulats
E	Eau
E/C	Eau/Ciment
E/F	Eau/Fines
E/L	Eau/Liant
G	Gravier

G/S	Gravier/Sable
G_{lim}	Volume absolu 1 m ³ de gros granulats
K_{sf}	Taux de fines particules
L	Laitier de haut fourneau
M_b	Module de basicité
MBE	Mortier de Béton Equivalent
P	Poudre (Ciment+ajout)
R_b	Risque de blocage
R_c	Résistance à la compression
R_m	Vitesse relative
R_f	Résistance à la flexion
r_1	Diamètres d'étalement (xx)
r_2	Diamètres d'étalement (yy)
S	Affaissement Final
SCC	Self-Compacting Concrete
S/M	Sable/Mortier
S_p	Superplastifiant
S_p/L	Superplastifiant/Liant
SSB	Surface Spécifique de Blaine
T	Temps d'affaissement, (sec)
t	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V du mortier, (sec)
T_{20}	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 20 cm, (sec)
T_{40}	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 40 cm, (sec)
T_{50}	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm, (sec)

T_{vf}	Temps d'écoulement à l'entonnoir, (sec)
$V_{cri,i}$	Teneur volumique critique de taille i
V_i	Proportion volumique des granulats de taille i
V_p	Volume de pâte, (m ³)
V_{vides}	Volume de pâte, (m ³)
V_w	Volume d'eau, (m ³)
Π	Pourcentage de laitance
ρ_C	Masse volumique du ciment
ρ_E	Masse volumique d'eau
ρ_G	Masse volumique du gravier
ρ_S	Masse volumique du sable
ρ_{Ps}	Masse volumique du superplastifiant
Γ_m	Etallement relatif
τ	Contrainte de cisaillement,(Pa)
τ_0	Seuil de cisaillement,(Pa)
μ	Viscosité plastique, (Pa.s ⁻¹)
$\dot{\gamma}$	Vitesse de déformation, (s ⁻¹)

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime de ciment, de granulats, et d'eau, ces constituants sont dosés de manière à obtenir après le durcissement, un produit rocheux artificielle dont la capacité de résistances à la compression élevé.

De nos jours, les bétons ne sont plus fabriqués seulement avec des granulats, du ciment portland et de l'eau ; ils incorporent très souvent, si ce n'est pas toujours, au moins l'un des produits suivants : les adjuvants, additions minérales, fibres, et en plus de la résistance finale en compression. Ces bétons doivent répondre à de nombreuses spécifications relatives aux propriétés rhéologiques, aux caractéristiques au jeune âge, aux propriétés de déformations et aux aspects de durabilité.

L'étendue des exigences possibles a augmenté de façon spectaculaire. Par exemple, les structures actuelles se caractérisent par la complexité de leurs modèles telles que les formes variables et les courbures multiples, ainsi que par leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons ordinaires à ce type d'ouvrages très difficile avec des défaillances structurales très probables. Toutefois, pour construire des structures durables et fiables, il est nécessaire non seulement, de développer un béton de qualité, mais aussi d'assurer une mise en place correcte afin de répondre aux exigences demandées pour la mise en service de la structure. D'où l'idée des chercheurs japonais à essayer de fabriquer des bétons répondants à ces exigences, qui fût appelé par la suite le Béton Autoplaçant.

Par définition, les bétons autoplaçants ne nécessitent aucune vibration pour être mis en place et consolidés. Ils peuvent couler à travers un réseau dense d'armateurs sans présenter de ségrégation importante, ni blocage, ces bétons récemment apparus sur le marché, ne font encore appel à aucune méthode spécifique de formulation normalisée, dans aucun pays. Ils ont été développé la première fois au Japon vers la fin des années quatre-vingts.

L'introduction du BAP représente des progrès technologiques importants, ce qui conduit à un béton de meilleure qualité et un processus de construction efficace. Les principaux avantages de l'utilisation du BAP dans la construction consistent à raccourcir la période de construction et d'augmenter ainsi la productivité, en assurant le compactage de la structure (en particulier dans des zones confinées où il est difficile en général), permet le pompage du béton à une grande hauteur et ainsi améliorer la qualité de construction et d'éliminer le bruit dû aux vibrations conduit à une amélioration substantielle de l'environnement de travail sur le site.

Les exigences que doit satisfaire un BAP par rapport à un béton vibré pour aboutir les avantages cités précédant sont sensiblement plus élevées en ce qui concerne sa formulation et sa caractérisation à l'état frais. Sa formulation requiert une étude précise, en utilisant les mêmes composants de base comme le béton vibré, à savoir, le ciment, granulats, d'eau et divers additifs et adjuvants. Cependant, la conception du BAP est différente car la quantité d'agrégats grossiers dans des mélanges de BAP est beaucoup plus faible que dans le béton vibré. D'autre part, ils contiennent une grande quantité des fines et / ou additifs pour augmenter la viscosité. De cette façon, la stabilité du mélange est maintenue, le ressuage est réduit, et la séparation des agrégats grossiers est évitée. Les additions les plus souvent utilisés pour augmenter la viscosité des mélanges de BAP sont les cendres volantes, laitier, pouzzolane, filler calcaire et les fumées de silice.

L'utilisation de ces additions minérales dans la formulation des BAP contribue aussi à réduire le coût du béton et par la suite freiner l'augmentation des coûts de construction, puisque le coût de ces bétons associés avec utilisation d'un volume élevé de ciment Portland et d'adjuvants chimiques. Les économies dans le coût du BAP pourraient être compenser par la substitution du ciment par les additions minérales qui amélioré ses propriétés à l'état frais et la l'état durci. D'ou l'utilisation des déchets et des sous-produits industriels, sont les principales actions à prendre afin de réduire l'utilisation des ressources non renouvelables et l'impact négatif sur l'environnement.

Notre idée était donc, d'orienter notre recherche en vue de valoriser les matériaux locaux utilisés dans la construction et étudier l'effet de l'incorporation d'un ajout tel que le laitier sur les propriétés des bétons. Les bénéfices qui pouvaient être tirés en utilisant le laitier comme remplacement de ciment sont multiples, il contribue à la préservation de

l'environnement et permet d'élaborer un BAP à moindre coût (le coût du laitier et son transport ; l'économie du coût du combustible pour la production de la même quantité de ciment) et également amélioré les propriétés frais et durci des bétons.

le présente travail a pour objectif d'approfondir les connaissances ultérieures sur la valorisation de laitier de haut fourneau provient de la complexe sidérurgie d'Annaba comme addition dans les bétons autoplacants et, également d'essayer rechercher et d'expliquer à savoir en premier lieu, si la substitution pondérable d'une certaine quantité du ciment par le laitier (0%, 10%, 15%, 20%, 25%) permettrait d'obtenir des BAP ayant des propriétés comparables ou plus performantes que celles connues à l'échelle internationale et en second lieu l'effet de la finesse du laitier préparé (3500, 4200 et 5000 cm^2/g) sur le comportement rhéologique de BAP.

Pour cela nous avons réparti notre travail comme suit :

Après une introduction générale, le présent travail est divisé en trois chapitres : le premier chapitre de notre travail est consacré à l'étude bibliographique. Cette partie est destinée à initier le lecteur à mieux comprendre certaines notions fondamentales relatives aux caractéristiques des BAP à l'état frais, les différentes formulations et ainsi et les résultats donnés dans la littérature sur l'influence des additions minérales sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques et durabilité des BAP. Le second chapitre est consacré à l'étude expérimentale. Nous décrivons les matériaux utilisés et les formulations du BAP et nous présentons aussi l'ensemble des essais effectués au laboratoire pour l'élaboration d'un BAP, en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire. Le troisième chapitre présente et regroupe les différents résultats obtenus et leurs discussions. Enfin, une conclusion générale sur nos travaux ainsi que d'éventuelles perspectives clôture ce travail expérimental.

A la fin de ce travail on trouve deux annexes où on a présenté en détail les différentes étapes pour le calcul de la composition du mortier (Annexe A) puis le calcul de la composition du béton autoplacant (Annexe B).

CHAPITRE 1

LE BETON AUTOPLAÇANT – ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Généralités

Dans ce premier chapitre, on présente une synthèse bibliographique sur les caractérisations des BAP à l'état frais, les différentes formulations et ainsi l'influence des additions minérales sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques et durabilité des BAP.

1.2 Définition des bétons autoplaçants

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, qu'ils sont extrêmement fluides c'est-à-dire très déformables et capables, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange avec, comme résultat, un produit très homogène.

1.3 Historique des bétons autoplaçants

Beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle. Afin d'adapter le béton à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de béton se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, ressuage), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité [1].

Les bétons autoplaçants ont été développés au Japon à la fin des années 80. Leur origine semble provenir de la nécessité d'utiliser des matériaux de plus en plus performants pour palier une réduction de la qualité des constructions due à une mauvaise mise en place du matériau [2].

1.4 Spécificité de la composition des BAP

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre. Les approches de formulation des BAP font appel à :

a. Volume de pâte élevé

Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. C'est pourquoi les BAP contiennent un volume de pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) important, typiquement de 330 à 400 L/m³, dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres.

b. Quantité élevée de fines (particules < 125 µm)

Pour leur assurer une maniabilité suffisante, tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels. Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire, voire ternaire : ciment Portland mélangé avec cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc.

c. Utilisation de superplastifiants

Les BAP contiennent des superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

d. Utilisation éventuelle d'un agent de cohésion (réteneur d'eau)

Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation. Les agents de cohésion ont la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis du problème du ressuage et de la ségrégation.

e. Faible volume de gravillons

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et, donc, de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP et le diamètre maximal D_{max} des gravillons est compris entre 10 et 20 mm.

f. Un rapport E/C faible et un dosage en eau limité [3]

L'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton, l'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne l'apparition des phénomènes de ségrégation et de ressuage, pour cela on utilise un rapport E/C faible et un dosage en eau limité.

Chaque spécification de la composition des BAP cité précédent joue un rôle important dans l'écoulement et dans le comportement rhéologique du BAP. La Figure 1.1 présente une comparaison entre les deux types de béton, le béton ordinaire et le béton autoplaçant.

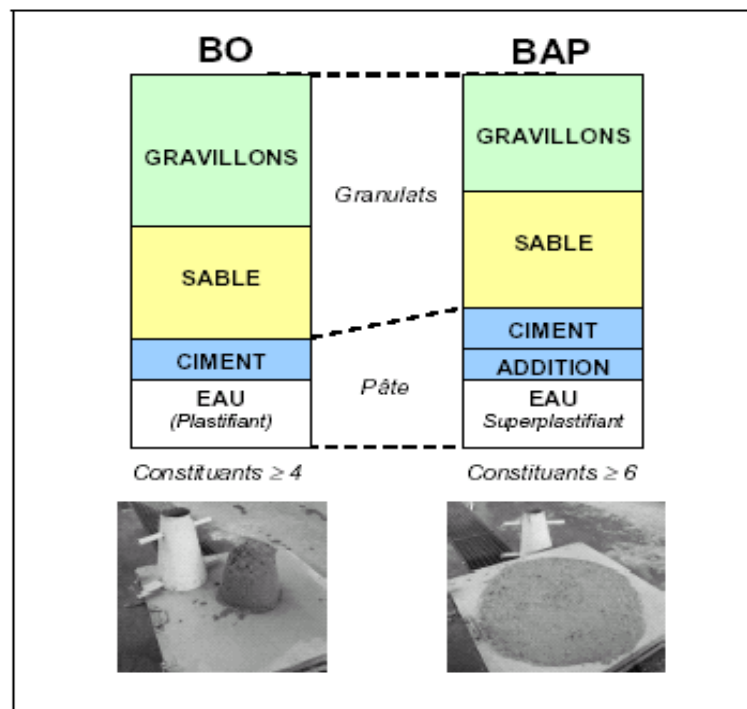


Figure 1.1 : Comparaison entre un béton ordinaire (BO) et un BAP [2].

1.5 Avantages du BAP (techniques et socio-économiques)

La qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire. On peut résumer les avantages du BAP dans les points suivants :

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 ferrillés.
- Amélioration de la qualité esthétique des parements et de l'enrobage des aciers.
- Réalisation d'éléments de formes plus complexes ou de grande hauteur.

Avantages socio-économiques :

La fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- Une diminution du bruit sur site.
- Une diminution de la pénibilité des tâches.
- Une réduction des risques d'accident.

L'utilisation d'un BAP peut s'avérer plus économique que celle d'un béton ordinaire, et ce malgré un surcoût de formulation. Ce surcoût est principalement lié à l'adjuvantation puisque la fluidité doit être instantanée. Cependant, ces frais supplémentaires peuvent rapidement être compensés par la diminution des coûts de main d'œuvre, du temps de coulage et des besoins de ragréage, des délais de fabrication, etc.

Toutefois, le désavantage principal de ce béton est qu'il entraîne un accroissement du coût des matières premières, de la fabrication et du contrôle. Sur chantier, il nécessite également des coffrages plus étanches afin de reprendre les pressions exercées.

1.6 Constituants des bétons autoplaçants

Le BAP est constitué des mêmes matériaux que le béton vibré (ciment, gravier, sable et l'eau) et des superplastifiants et ajouts minéraux.

1.6.1 Le ciment

Tous les ciments qui se conforment à la norme EN 197-1 [5] peuvent être employés pour la production du BAP. Le choix correct du type de ciment est normalement dicté par les conditions spécifiques de chaque application ou ce qui actuellement est employé par le producteur plutôt que les conditions spécifiques du BAP [6].

1.6.2 Les ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux finement divisés et pouvant être ajoutés au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou lui conférer des propriétés particulières c'est pour cette raison dans les BAP il est souvent nécessaire d'utiliser des additions minérales (fumées de silice, laitiers, cendres volantes, additions calcaires, pouzzolanes naturelles, etc.).

L'utilisation des additions minérales est intéressante sur le plan rhéologique car elles sont, d'une part, moins réactives à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et, d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granularités différentes permet également d'améliorer, de façon générale, la granulométrie du mélange de béton, ce qui favorise à la fois une bonne stabilité et une bonne déformabilité du béton à l'état frais [1]. En plus, l'utilisation des ajouts naturels actifs a pour effet de diminuer l'énergie nécessaire à la production du ciment (l'ajout étant ajouté après refroidissement de clinker) et d'augmenter la durabilité des bétons obtenus.

Le type de filler et sa finesse ont une forte incidence sur la quantité de superplastifiant pour un étalement donné. En général, une matière pouzzolanique tel que la cendre volante améliore la déformabilité du béton (particules sphériques et lisses), La fumée de silice augmente la résistance à la séparation des constituants du béton et réduit significativement les phénomènes de ressuage et de ségrégation [6].

Il est bien prouvé que le caractère inerte ou actif de laitier peut avoir des effets sur le béton autoplaçant à l'état frais par l'amélioration de la fluidité et l'élimination des risques de ségrégation en relation avec le dosage. Behim et Boucetta [7] ont montré que le laitier de haut fourneau influence peu l'étalement jusqu'à un dosage de 30 % au-delà de cette valeur ils ont noté plutôt une diminution de l'étalement. Boukendakdji et al. [8] ont confirmé que la substitution partielle du ciment par du laitier Algérien a modifié la performance du BAP à l'état frais et durci et un taux de substitution d'environ 15% semble optimal.

Le laitier de haut fourneau est supposé d'améliorer la résistance et la maniabilité (particules vitreuses) et aussi adsorbe le superplastifiant, il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité [7] donc le laitier par son caractère hydraulique latent, son écoulement dépend de deux composantes, une composante physico-chimique liée au potentiel d'interaction entre les particules et de l'interaction des fines avec le liquide saturant, et une composante granulaire liée aux frottements des particules [9].

1.6.3 Les Granulats

Les granulats (sable et gravier) constituent le squelette du béton. Ils sont définis comme un ensemble de grains minéraux et doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air.

Pour obtenir un BAP, le volume du gravier et la taille maximale des granulats sont réduits pour diminuer les frictions et éviter les blocages dans des zones confinées. Le volume des gros granulats est donc limité, et le rapport gravillon/sable est proche de 1. En ce qui concerne le diamètre maximum des granulats, il est conseillé de rester dans la limite de 20 mm [3].

La quantité de sable contenue dans le mortier doit également être contrôlée. Les essais montrent que pour un rapport $V_{\text{sable}}/V_{\text{mortier}}$ supérieur à 50%, la capacité de remplissage, mesurée à la U-Box, diminue nettement. Moins il y a d'interaction entre les particules, plus le béton s'écoule facilement quelle que soit la configuration d'essai [3].

1.6.4 L'eau de gâchage

L'eau potable sert de référence pour la formulation du béton à cause de sa disponibilité. L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.). Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NF P 18-303 [10].

1.6.5 Adjuvants des bétons

L'utilisation des superplastifiants en combinaison avec les ajouts cimentaires améliore les propriétés rhéologiques des bétons autoplaçants. Des agents colloïdaux sont aussi utilisés pour réduire la ségrégation.

L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure 1.2). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles et augmenter la résistance de 10% à 24 heures et de 20% à 28 jours avec un rapport E/C constant [11]. En général, les superplastifiants utilisés dans les formulations des BAP sont du type polyméline sulfoné, polycarboxylate ou de naphthalène sulfonate.

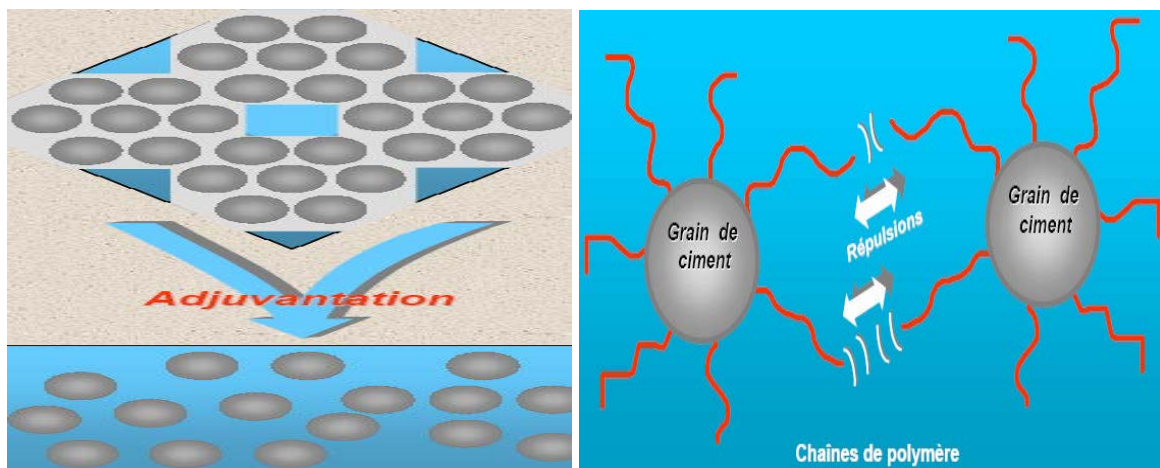


Figure 1.2 : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment [12].

Les agents de viscosité sont des polymères qui ont été développés pour éviter le délavement à l'état frais des bétons coulés sous l'eau. Il s'agit généralement de dérivés celluliques (à base de méthyle cellulose et d'hydrox-éthyle), de polysaccharides obtenus par fermentation microbologique, ou de suspensions colloïdales. Ces produits, améliorent la viscosité et diminuent la ségrégation et le ressuage dans les bétons [1], aident à maintenir la fluidité et la capacité de remplissage au cours du temps estimé à environ une heure [13]. Par contre, ils augmentent la demande en eau du mélange et nécessite leur utilisation la présence de superplastifiants [1].

1.7 La formulation des bétons autoplaçants

Le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton. Il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités

différent selon les régions ou les pays. La variation de matériau peut conduire à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, résistance).

L'approche d'optimisation pour développer les performances d'un béton et sa durabilité consiste en général à choisir et examiner un groupe d'essais préliminaires, évaluer les résultats puis ajuster les propositions du mélange et examiner d'autres mélanges jusqu'à ce que les propriétés exigées soient réalisées. À cet effet, beaucoup de chercheurs se sont orientés vers l'optimisation et le développement des formulations des BAP. Quelques résultats de ces recherches seront exposés dans cette partie.

1.7.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

Okamura [2, 14, 15], propose de formuler les BAP en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est fixée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaires, à la moitié de leur compacité.

A la suite d'une optimisation identique du mortier, d'autres chercheurs [15] ont proposé de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

1.7.2 Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Son rôle est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. La notion de quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage a été aussi introduit (Figure 1.3).

Des formules empiriques reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte ont été proposées [15]. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser

et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, et Bai [15]. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés, un volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage.

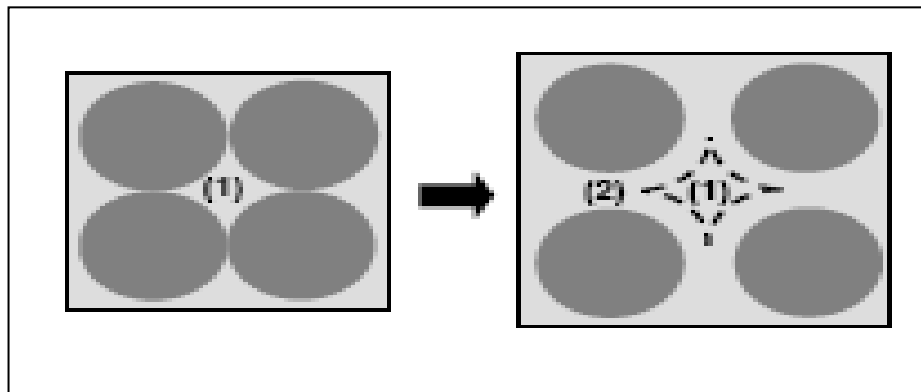


Figure 1.3 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2) [15].

1.7.3 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons [16]. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Sedran et Turcry [14, 15], ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlabpro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc.). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

1.7.4 Méthode basée sur un plan d'expérience

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. Une étude [1] a été réalisée avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines $E/(C+A)$, la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) [18].

1.7.5 L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE

L'approche du Mortier de Béton Equivalent (MBE) a été initialement développée pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation d'un béton, en utilisant des tests sur mortier au lieu de tests sur béton [19]. En fonction des essais préalables réalisés, les résultats obtenus peuvent être utilisés de façon qualitative ou quantitative.

Plusieurs chercheurs [19] ont montré que cette méthode peut être adaptée aux BAP et aussi que les principes de base de la méthode peuvent être gardés.

1.8 Principe et application des approches

1.8.1 Approche Japonaise ou la méthode générale

Okamura et Ozawa ainsi que Ouchi et al. [2,20] sont les précurseurs en matière de formulation des BAP. Les caractéristiques requises sont une capacité de déformation élevée de la pâte et du mortier, ainsi qu'une résistance à la ségrégation lors de l'écoulement en milieu confiné. Leur méthode de formulation se base sur les critères suivants :

- Une quantité de gravillons limitée,
- Un rapport eau/poudre faible,
- Utilisation d'un superplastifiant.

Cette méthode consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances.

Le principe de cette méthode est le suivant :

- La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide pour éviter le risque de blocage :

$$G = \frac{50}{100} G_{lim} (1 - A) \quad (1.1)$$

Où : A = quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel

G_{lim} = volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats.

- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier pour assurer une bonne ouvrabilité :

$$S = \frac{40}{100} \frac{(1-A-G)}{(1-K_{sf})} \quad (1.2)$$

Où : K_{sf} = taux de fines particules (< 0,09 mm) dans le sable

- L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante et une fluidité importante.

Un étalement relatif (Γ_m) est déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et la vitesse d'écoulement relative (R_m) est déterminée par un essai au V-funnel pour mortier :

La fluidité du mortier, donnée par :

$$\Gamma_m = \frac{(r_1 r_2 - r_0^2)}{r_0^2} \quad (1.3)$$

Avec r_1 et r_2 les diamètres d'étalement selon deux médianes.

La viscosité du mortier, donnée par :

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (1.4)$$

Avec t le temps d'écoulement à l'entonnoir en V exprimé en secondes.

Ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de Γ_m est élevée, plus le mortier est fluide) et la viscosité (plus la valeur de R_m est faible, plus la viscosité est élevée) du mortier. Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1 \pm 0,1$. Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant satisfaisant [21].

1.8.2 Approche Suédoise (CBI)

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cement och Betong Institutet) et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette approche est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures, et le volume des granulats dans le béton.

Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles, passant à travers différents espacements d'armatures. Pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats), et de la forme des granulats (roulés ou concassés). Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide.

Ainsi, dans la formulation d'un béton, la méthode CBI consiste à déterminer le risque de blocage R_b par la relation :

$$R_b = \sum \frac{V_i}{V_{cri,i}} \quad (1.5)$$

Où : V_i = la proportion volumique des granulats de taille i , par rapport au volume total du béton.

$V_{cri,i}$ = la teneur volumique critique de cette fraction granulaire de taille i .

La valeur du coefficient du risque de blocage R_b doit être inférieure ou égale à 1 pour obtenir un béton satisfaisant. Ainsi, en utilisant cette approche pour évaluer le risque de blocage de bétons, on réécrit l'équation du risque de blocage :

$$R_b = (1 - V_p) \cdot \sum \frac{Y_i}{V_{cri,i}} \quad (1.6)$$

Où : Y_i = la proportion volumique des granulats de taille i rapportée au volume total des granulats.

V_p = le volume de la pâte dans un volume unité de béton.

A partir de cette relation, on peut déduire, pour chaque rapport gravier sur sable (G/S), le volume minimal de pâte pour éviter le risque de blocage. On écrivant $R_b = 1$, le rapport

E/C de la pâte et le type du ciment sont choisis en fonction de la gamme de résistance visée, le dosage du superplastifiant est optimisé pour obtenir un écoulement autoplaçant caractérisé essentiellement par le cône d'Abrams (un étalement de 700 mm est jugé adéquat) et la boîte en L (un rapport d hauteurs H_2/H_1 doit rester au dessus de 0,8) [21].

1.8.3 Approche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre.

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (Bétonlapro 2).

Une proportion de liant est fixée à priori, pour laquelle on détermine le dosage à saturation du superplastifiant utilisé. Selon l'expérience des auteurs, le dosage de saturation pourrait conférer au béton une viscosité élevée, par conséquent la moitié de ce dosage serait plus pertinente. Le besoin en eau du liant en présence du superplastifiant est déterminé, et conduit au calcul de la compacité propre du liant, qui est une donnée d'entrée nécessaire. Grâce au logiciel, les dosages des constituants sont déterminés, en prenant en compte tous les paramètres de calcul, et de l'effet de paroi. Le dosage du superplastifiant peut être ajusté pour obtenir les critères d'ouvrabilité désirés, celui de l'eau pour obtenir la résistance à la compression ciblée [21].

1.9 Caractérisation du BAP à l'état frais

1.9.1 Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP

1.9.1.1 Notions fondamentales de rhéologie

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet de contraintes appliquées, étant donné le taux d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation dans le temps [22]. Par cette science, il est possible d'établir des relations entre les contraintes, les déformations et le temps.

Le but de l'étude du comportement rhéologique d'un corps est d'estimer le système de forces nécessaires pour causer une déformation spécifique, ou la prévision des déformations causées par un système de forces spécifiques. C'est dans les années 1970 que l'on a commencé à s'intéresser à la mesure de la rhéologie du béton frais. Pour le cas du béton, on s'intéressera à l'étude de son écoulement alors qu'il est encore à l'état frais et maniable [23].

Il existe plusieurs modèles de comportement rhéologique qui peuvent s'appliquer aux corps fluides. La Figure 1.4 présente des courbes de comportement pour les deux grandes familles de corps fluides. Le comportement rhéologique de ces corps est illustré à partir de la relation taux de cisaillement- contrainte de cisaillement.

La première famille de comportement rhéologique comprend les corps exclusivement visqueux. Dans cette famille, on peut retrouver, entre autres, les corps Newtoniens. L'écoulement de ces corps se produit aussitôt qu'une contrainte est appliquée et le comportement est alors déterminé uniquement par la viscosité. Elle est une grandeur physique qui caractérise l'existence d'une résistance à l'écoulement. La viscosité est une propriété intrinsèque au fluide ; son effet se manifeste seulement lorsqu'il y a mouvement et la résistance qui en résulte est parallèle à la direction de l'écoulement [24].

La seconde famille de comportement rhéologique comprend les corps viscoplastiques. Pour ces corps, en plus de la viscosité, il faut vaincre une résistance supplémentaire avant que l'écoulement puisse s'amorcer. Il s'agit d'un seuil de plasticité aussi appelé seuil de cisaillement dans le cas des corps Binghamiens. La courbe d'écoulement d'un corps Binghamien est une droite dont l'équation à la forme suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1.7)$$

Avec τ la contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 le seuil de cisaillement (Pa), μ la viscosité plastique de la pâte ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) et $\dot{\gamma}$ la vitesse de déformation (s^{-1}) [25].

Pour chacune des deux familles de comportement, il existe des modèles complémentaires pour lesquels la viscosité n'est pas constante mais dépendant du taux de cisaillement. Dans le cas où la contrainte de cisaillement augmente lorsque le taux de cisaillement augmente, il s'agit de corps épaississants ; si la contrainte de cisaillement diminue lorsque le taux de cisaillement augmente, il s'agit alors de corps fluidifiants.

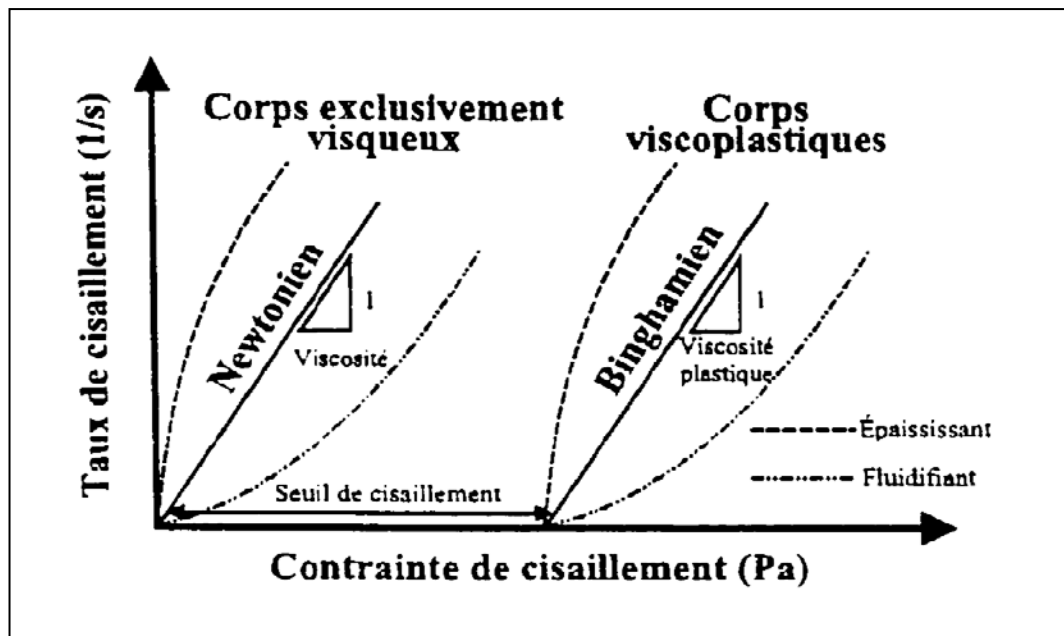


Figure 1.4 : Courbes de comportement rhéologique pour les corps fluides [22].

1.9.1.2 Lois du comportement rhéologique des BAP

Le comportement rhéologique des fluides le plus simple est le comportement Newtonien qui a une relation linéaire entre contrainte de cisaillement et taux de cisaillement. Mais les mesures réalisées sur bétons [26] montrent que ces matériaux ne sont pas des fluides Newtoniens, mais qu'ils présentent un comportement viscoplastique. Cela veut dire qu'au-dessous d'une valeur de la contrainte critique (c.-à-d. le seuil de cisaillement), la matière se comporte comme un solide mais s'écoule comme un liquide visqueux, quand cette contrainte est dépassé ($\tau > \tau_0$).

Différents modèles peuvent être utilisés pour décrire le comportement rhéologique des bétons. Dans la pratique, deux modèles sont couramment utilisés pour les BAP : le modèle de Bingham et le modèle de Herschel-Bulkley représentés sur la Figure 1.5.

Plusieurs auteurs [26] ont utilisé fréquemment le modèle de Bingham pour modéliser le comportement des BAP avec un seuil de cisaillement τ_0 de faible valeur. Cependant, d'autres auteurs [26,27] ont montré que le comportement des BAP, comme celui de nombreuses autres suspensions de particules, peut être décrit par un comportement non linéaire épaississant, et suivent une loi de type Hershel-Bulkley. Celui-ci fait intervenir trois paramètres intrinsèques (τ_0 , K , n) qui permettent de décrire l'écoulement en régime permanent du matériau si celui-ci reste homogène (pas de ségrégation des particules).

La contrainte de cisaillement τ est reliée au taux de déformation par la relation suivante :

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (1.8)$$

Pour un comportement épaississant la valeur de n est supérieure à 1 par contre si n inférieur à 1 le matériau est dit fluidifiant. Ces paramètres intrinsèques sont accessibles à l'aide des différents essais donnée au Tableau 1.1.

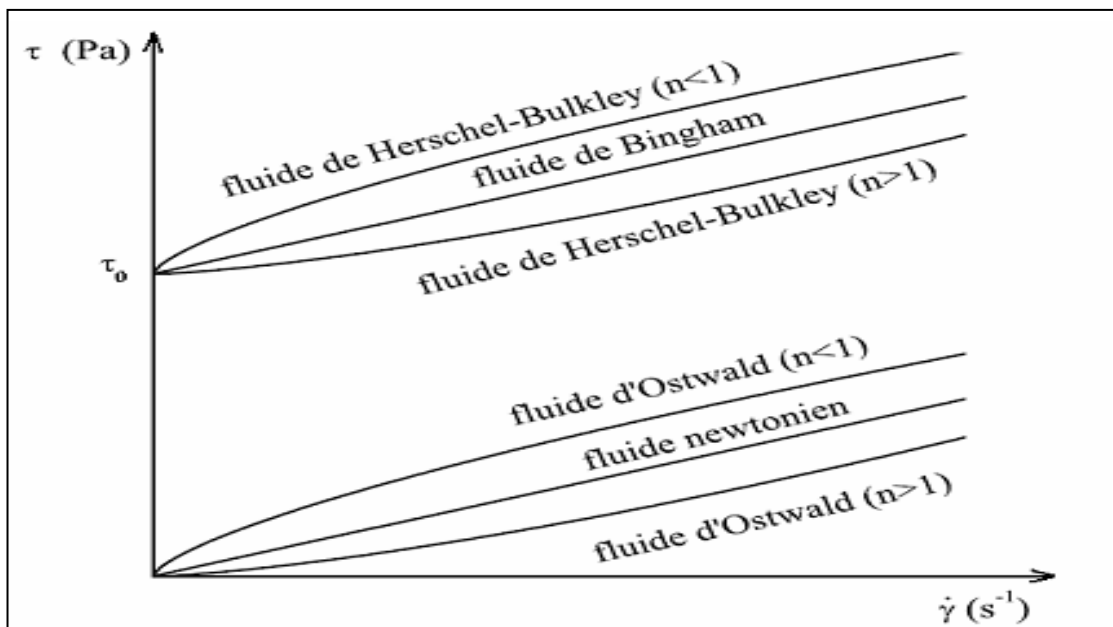


Figure 1.5 : Différents Comportements d'écoulement [1].

Tableau 1.1 : Essais permettant la détermination des paramètres rhéologiques des BAP

Propriété	Essais à réaliser
Mesures Rhéologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Etalement au cône d'Abrams modifié • Temps d'Affaissement de 100 mm au cône d'Abrams modifié • Temps T_{20} de la Boîte en L (L-Box) • Temps T_{40} de la Boîte en L (L-Box) • Evaluation du Seuil de Cisaillement • Evaluation de la Viscosité Plastique • Essai au Rhéomètre IBB • Essai de deux-Points de Tattersal • Essai à l'appareillage de Bertta • Essai au rhéomètre de BTRHEOM

Malgré le fait que la réalisation d'essais rhéologiques est difficile, les différentes données indiquent que la valeur du seuil d'écoulement des BAP est bien plus faible que celui des autres bétons [14]. La Figure 1.6 représente le comportement de quelques bétons fluides.

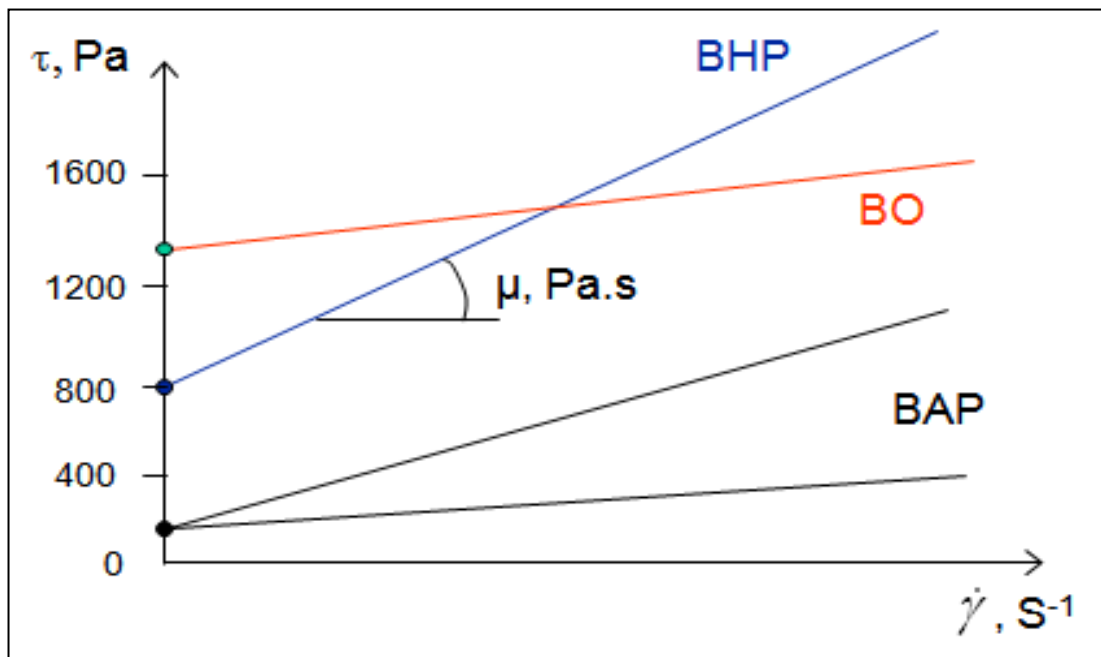


Figure 1.6 : Exemples de comportement rhéologique pour différents types de béton [4].

1.9.1.3 Facteurs influençant la rhéologie des BAP

Les facteurs qui affectent la rhéologie du béton frais sont nombreux. Tous les changements effectués sur la composition d'un mélange de béton influencent à des niveaux différents ses propriétés. En isolant chacun de ces facteurs cités dans le paragraphe suivant, il est possible de distinguer des tendances générales à savoir quel sera l'effet sur le seuil de cisaillement ou sur la viscosité plastique. Cependant, ces facteurs ne sont pas indépendants les uns face aux autres et la prévision du seuil de cisaillement et/ou de la viscosité devient relativement compliquée quand tous les facteurs sont considérés. Parmi les principaux facteurs sont :

a- Type de ciment

L'influence des caractéristiques du ciment sur la rhéologie est non négligeable, particulièrement pour les mélanges riches en ciment [26]. Les principales caractéristiques du ciment influençant la rhéologie sont :

- La composition chimique du ciment (en particulier, la teneur en C_3A) ;
- La finesse du ciment ;
- La quantité de ciment dans le mélange.

L'influence de la composition du ciment, en particulier la quantité de C_3A qui réagit très rapidement, va déterminer la rhéologie du mélange. Pour les pâtes de ciment, le seuil de cisaillement augmente brutalement quand la teneur en C_3A varie de 7,5 à 9,5% environ [26]. Mais en dehors de cette zone, le seuil ne dépend pratiquement pas de la teneur en C_3A . Quand à la viscosité, elle augmente régulièrement en fonction de cette teneur.

D'autres chercheurs [28] ont montré que le seuil de rigidité d'une pâte de ciment varie avec sa teneur en alcalis et en C_3A . Cette étude a aussi montré que le seuil de cisaillement augmente proportionnellement à la teneur en C_3A et diminue quand la concentration en SO_3 augmente.

b- Dosage en eau

L'eau est connue comme étant l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton [26]. L'augmentation de la teneur en eau de la pâte conduit à une augmentation de la teneur en eau libre du système, ce qui a pour effet d'éloigner les grains les uns des autres, diminuant ainsi les attractions électrostatiques (forces de Van der Waals : elles décroissent avec la distance entre particules chargées). Il en résulte une baisse du seuil de cisaillement.

De plus, cet apport d'eau permettant une meilleure lubrification (du fait de l'éloignement des particules, on diminue la friction lors de l'écoulement), il en résulte une diminution de la viscosité [29].

c- Superplastifiant

Les superplastifiants ont été développés pour donner au mélange une plus grande maniabilité et faciliter ainsi la mise en place. L'addition de superplastifiant produit une diminution du seuil de cisaillement sans affecter la viscosité plastique [22]. D'autres chercheurs [30] ont montré que pour un dosage en superplastifiant donné, le seuil de cisaillement est beaucoup plus affecté par le temps que la viscosité c'est-à-dire que le seuil de cisaillement augmente avec le temps, alors que la viscosité plastique reste pratiquement constante.

d- les granulats

D'après Hu [31], l'ajout de granulats n'a qu'un effet secondaire du point de vue rhéologique. Par contre, l'état de saturation en eau des granulats peut avoir une influence sur les paramètres rhéologiques, donc sur le comportement rhéologique du béton. L'utilisation de granulats non saturés influencé la quantité d'eau disponible pour le mélange, d'où une augmentation de seuil de cisaillement et de la viscosité. En ce qui concerne la forme des granulats, l'utilisation de granulats roulés donner un mélange maniable (diminution de la viscosité) à cause de deux phénomènes : l'effet de roulement à billes les unes sur les autres et la faible surface spécifiques d'une sphère. Il s'ensuit qu'une quantité moindre de pâte de ciment est nécessaire pour enrober les particules, permettant ainsi d'avoir un mélange plus fluide [22].

La granulométrie des granults est un facteur très important pour avoir un béton autoplaçant très maniable et résistant à la ségrégation. Plus un granulats est petit, plus la demande en eau est importante et ceci réduit la fluidité du mélange [21].

e- Laitier de haut fourneau

L'utilisation du laitier comme substitution d'une partie du ciment, améliore la maniabilité des mélanges vu que ces grains permettent un meilleur glissement intergranulaire dans la pâte. Les grains se caractérisent aussi par des surfaces vitreuses lisses à faible taux d'adsorption et leur effet est équivalent à une augmentation d'environ 5% de la quantité d'eau c.à.d. le laitier réduit le seuil et la viscosité des pâtes de ciment [32, 33]. Il a montré que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant et qu'il est possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil [7].

Boukendakdji [34] a montré que plus la quantité de laitier (pour une finesse $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$) est grande plus la valeur du seuil de cisaillement et la viscosité plastique diminuent dans le mélange.

1.10 Propriétés des BAP à l'état durci

Les BAP diffèrent essentiellement des bétons ordinaires vibrés par leurs propriétés à l'état frais. À l'état durci, leurs propriétés sont très voisines et dépendent directement du détail de la formulation.

1.10.1 Résistance à la compression

La résistance en compression à 28 jours de 30 à 60 MPa ne pose pas de problèmes avec les BAP, il est d'ailleurs difficile d'obtenir des résistances faibles, du fait de la richesse en éléments fins du mélange et de la limitation du dosage en eau (pour des problèmes de ségrégation) [3].

La résistance d'un béton à la compression est influencée par plusieurs paramètres tels que les ajouts comme filler de calcaire et fumée de silice.

L'évolution de la résistance à la compression du BAP sans fumée de silice est plus rapide que celle du béton ordinaire (BO), et celle d'un BAP avec fumée de silice est plus rapide que celle d'un BAP sans fumée de silice (Figure 1.7).

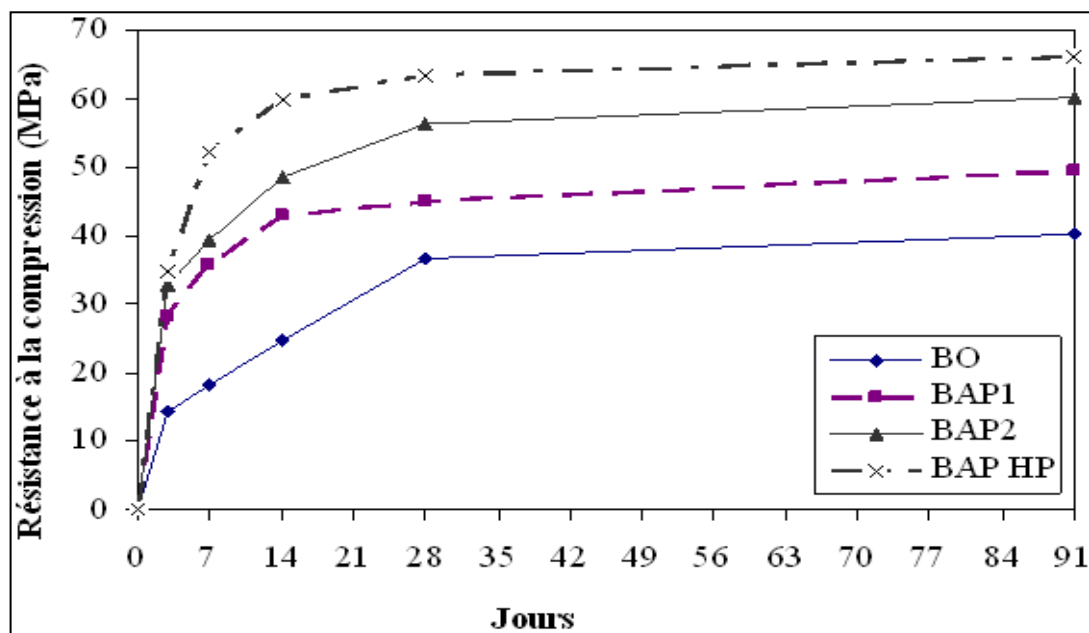


Figure 1.7 : Évolution de la résistance à la compression en fonction du temps [35].

Les meilleures résistances développées par les BAP avec fumée de silice sont dues à la réaction pouzzolanique avec la chaux dégagée par le clinker lors de l'hydratation du ciment. Cette réaction pouzzolanique permet de créer les silicates de calcium hydraté C-S-H d'une part et réduire la taille des pores capillaires d'autre part.

Cependant l'effet des fillers calcaires sur la résistance à la compression des BAP est différent, Bensebti [19] a observé que l'augmentation du taux de substitution du ciment par

des fillers calcaires de 17 à 33%, fait chuter la résistance à la compression de 19% à 7 jours, de 23% à 14 jours et de 27% à 28 jours.

Par contre, Assie et al. [36] ont montré que, les BAP présentent une résistance mécanique en compression légèrement supérieure à celle des bétons vibrés correspondants pour un rapport eau/liant similaire, et ce en raison de dosage en superplastifiant plus élevé que les bétons vibrés. Un autre élément affecte la résistance à la compression est le volume de la pâte. Rozière et al. [37] ont montré que le volume de pâte a un effet réel mais limité sur la résistance en compression. Ils ont observé une diminution de 12% de la résistance pour une augmentation de 57% du volume de pâte.

Boukendakdji et al. [8] ont introduit le laitier, par substitution, jusqu'à 25%. Ils ont observé pour les tous les âges une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de laitier.

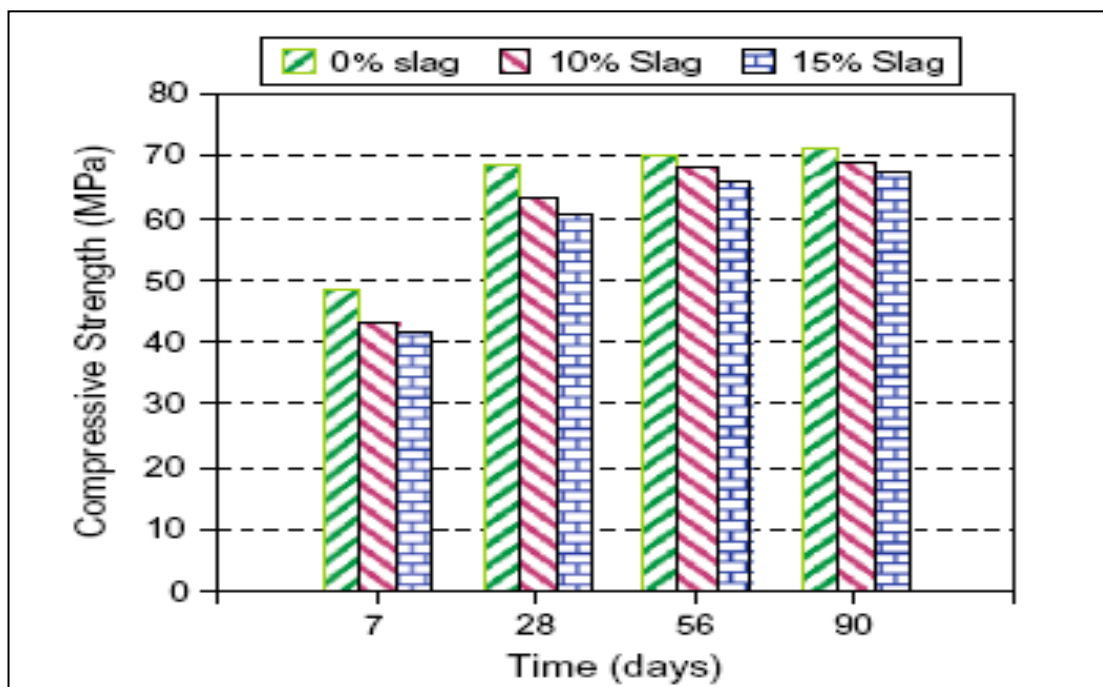


Figure 1.8 : Variation de la résistance à la compression avec l'âge pour le BAP [8].

Néanmoins, il faut souligner que les bétons préparés avec du laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours. Cependant, cette résistance se développe à partir du vingt-huitième (28) jour jusqu'à 90 jours [38].

Oner et al. [39] ont étudié l'effet de la finesse du laitier et du clinker sur la résistance à la compression du ciment au laitier (Figure 1.9). On peut voir que, pour une finesse constante du clinker, la résistance augmente proportionnellement avec la finesse du laitier. Cependant, cette amélioration n'est significative qu'à long terme. Une plus grande finesse du laitier permet un meilleur développement de la résistance.

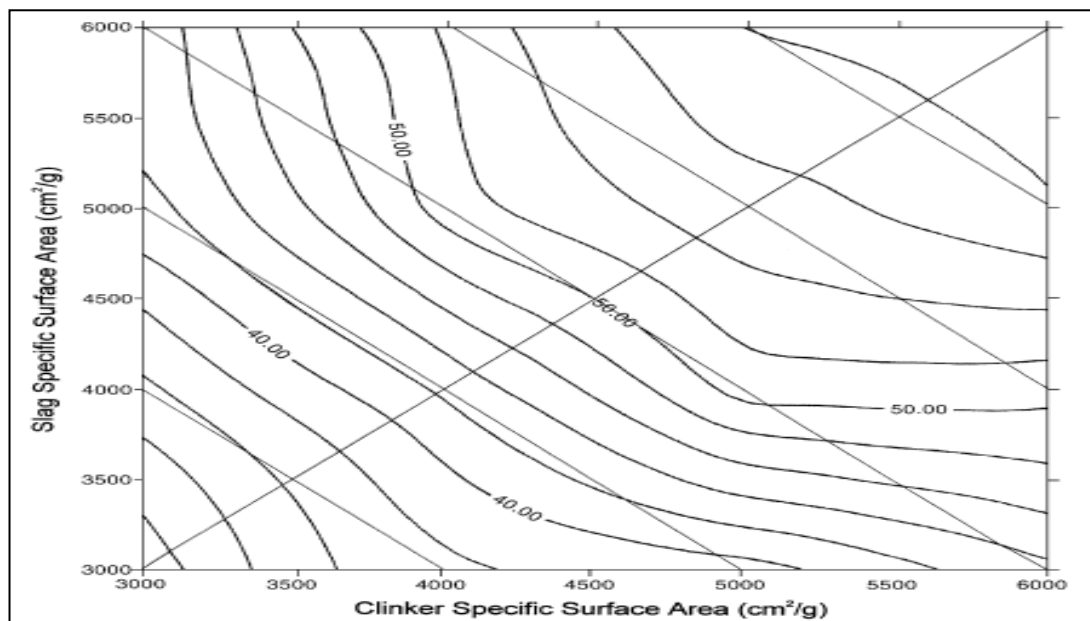


Figure 1.9: Courbe de résistance à la compression à 28 jours (MPa).

1.10.2 Résistance à la traction

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance. En effet, la résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres qui sont : la microstructure de la pâte cimentaire, l'homogénéité et la bonne répartition entre les granulats de la pâte liante.

La résistance à la traction est inversement proportionnelles au taux de substitution du ciment par des fillers calcaire [15, 19, 40]. Est une en moyenne de 8 à 15% moins que celle des bétons ordinaires.

Abib [35] a constaté que, l'évolution de la résistance à la traction d'un BAP (10% de fumée de silice, 2,5% du superplastifiant) est plus rapide que celle d'un béton ordinaire. Bensebti [19] a montré aussi que l'introduction de fibres dans la composition d'un BAP permet une augmentation considérable de la résistance à la traction par flexion. À 28 jours,

la résistance à la traction par flexion des bétons BAP21 ($F/F+C = 0,33$) et BAP24 ($F/F+C = 0,17$) ont augmenté respectivement de 45% et 43% suite à l'introduction de 0,5% de fibres dans leurs compositions.

Boukendakdji [34] a constaté que la résistance à la traction diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier mais cette diminution est moins importante à 90 jours.

Khatib et Hibbert [41] ont étudié la résistance à la flexion des bétons contenant des ciments au laitier sans ou avec 10% de métakaolin. A 90 jours, le béton avec 60% de laitier a développé une résistance à la flexion supérieure à celle du béton témoin. Cette supériorité était plus importante pour les bétons contenant en plus 10% de métakaolin (Figure 1.10).

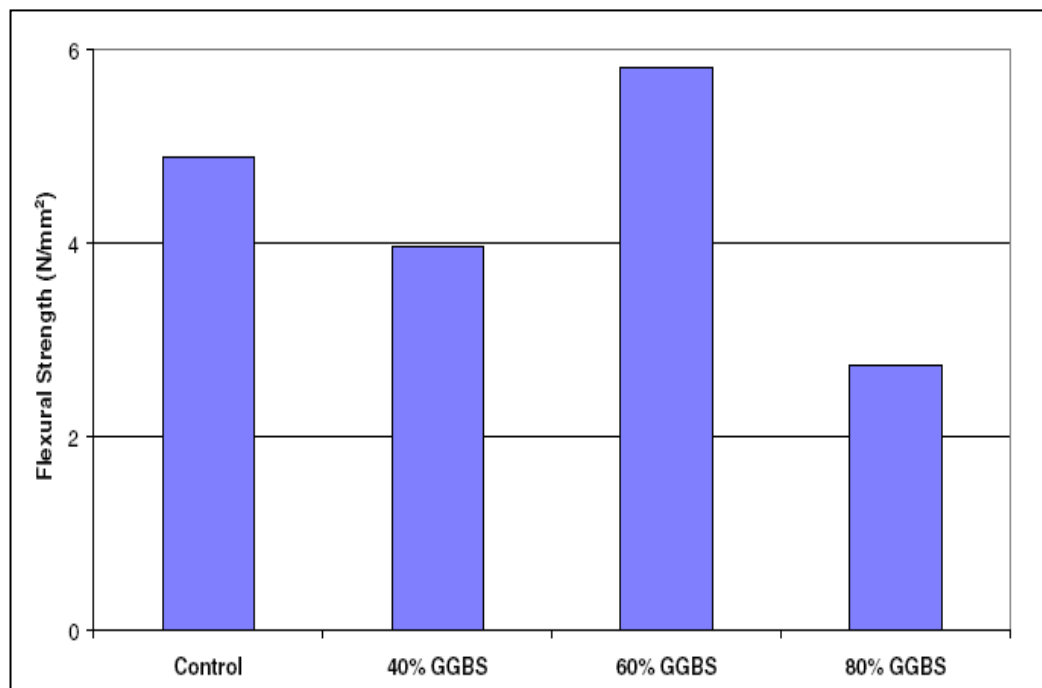


Figure 1.10 : Influence du laitier sur la résistance en flexion [41].

I.10.3 Module d'élasticité

Si on se réfère à la formule réglementaire du module d'élasticité ($E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. Cependant, certains chercheurs ont montré que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés en raison de l'augmentation du volume de la pâte [37].

Topcu et Uygunoglu [42] ont montré que le module augmente avec l'augmentation du rapport E/L et que l'utilisation des granulats légers dans les BAP génère une diminution de la valeur du module.

Domone [43] a montré que le module d'élasticité des BAP peut être jusqu'à 40% plus faible que celui correspondant aux BV et cela à des faibles valeurs de résistance en compression (≈ 20 MPa), mais cette différence décroît jusqu'au moins de 5% à des valeurs de résistance élevées (90 – 100 MPa).

1.11 Retrait

Le retrait est caractérisé par une déformation du béton (diminution du volume) sans aucun chargement extérieur. Il se décompose en quatre formes distinctes : le retrait thermique, le retrait endogène, le retrait de dessiccation et le retrait plastique.

À la vue du volume de pâte plus important, les BAP sont susceptibles d'être plus déformables que les bétons ordinaires. Les données de la littérature dans ce domaine montrent bien une tendance d'un retrait total plus important pour les BAP.

1.11.1 Retrait thermique

Le dégagement de chaleur par les réactions d'hydratation (exothermiques) augmente la température du béton, cette élévation de température provoque une dilatation pendant que le béton est encore déformable. Lorsque le refroidissement débute, le béton durci se contracte, alors que la prise a été déjà faite. La déformation étant limitée par la pâte durcie, les contraintes de traction se développent. Cette dernière provoque le retrait thermique.

1.11.2 Retrait endogène

Le retrait endogène, dû à l'hydratation du ciment. Cette réaction se poursuit après la prise et s'accompagne d'une diminution de volume. Le retrait endogène ou d'autodessiccation, est la conséquence macroscopique de cette contraction d'origine chimique.

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le BAP pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un BAP sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible [44]. Ce phénomène existe pour tout type de béton, en

particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. Par conséquent, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés (Figure 1.11).

Ce retrait est encore plus important lorsque le rapport F (fine)/C (ciment) est faible (Figure 1.12).

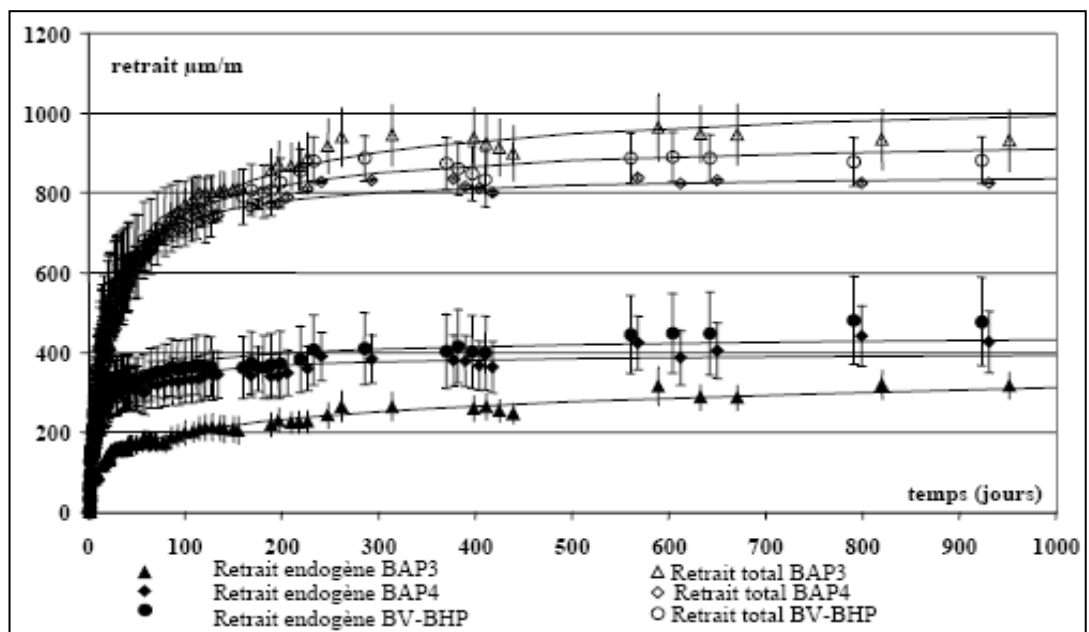


Figure 1.11 : Retraits endogène et totale d'un BV et de deux BAP de résistance 60 MPa [45].

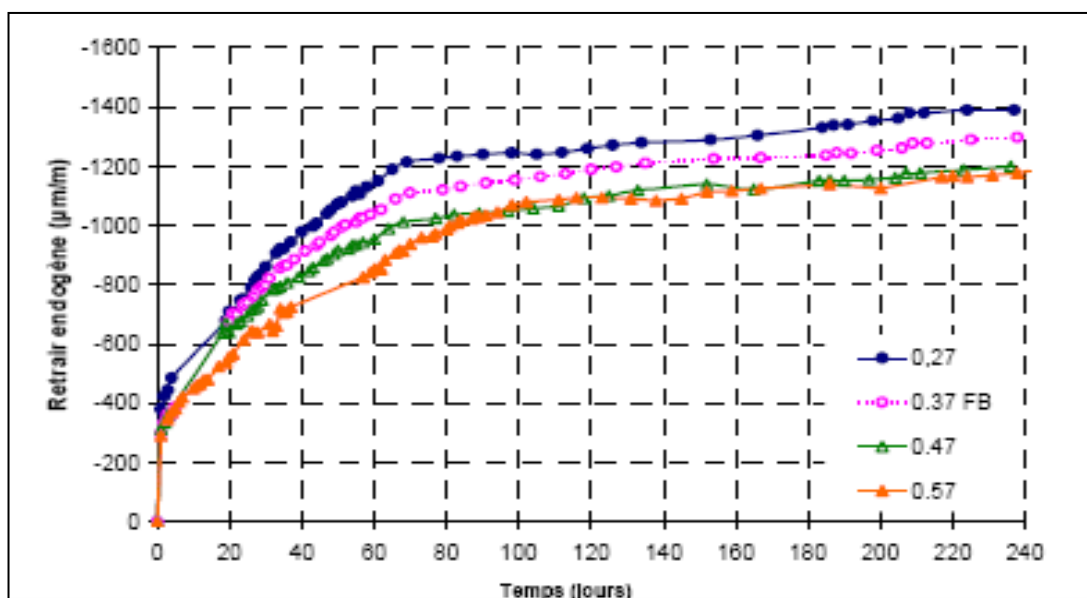


Figure 1.12 : Influence F/C sur le retrait endogène [44].

Le retrait endogène est proportionnel à la nature (sa finesse et sa composition) et au dosage du ciment. En revanche le dosage en superplastifiant n'a pas d'effet sur le retrait endogène [44].

Les ajouts cimentaires ont un effet considérable sur le retrait endogène. Ayed et al. [46] ont montré qu'à 7 jour d'âge, la déformation endogène des BAP à base de fines calcaires (BAP FC) et BAP à base de 40% pouzzolane naturelle (BAP PN) présente un écart très important d'environ de 35% en faveur des BAP PN. À 28 jours, l'écart entre BAP FC et BAP PN est presque nul. A long terme, 400 jours, le retrait endogène du BAP PN présente un retrait endogène plus grand de 32% par rapport au BAP FC.

Lee et al. [47] ont présenté des résultats expérimentaux sur le retrait endogène du béton avec le dosage de E/C allant de 0,27 à 0,42 et le pourcentage de laitier de haut fourneau dans la fourchette de 0% à 50% en masse de ciment. Le BAP fabriqué avec le laitier a montré plus grand retrait endogène que le béton ordinaire sans laitier. L'augmentation de retrait endogène varié en fonction du dosage de laitier pour le même E/C .

Le retrait endogène augmente aussi avec la proportion de pâte. L'évolution du retrait en fonction du volume de pâte ne semble néanmoins pas linéaire. Cela peut-être aussi la conséquence des variations de la structure du squelette [15].

1.11.3 Retrait plastique

Le retrait plastique est le retrait avant la prise du ciment, à un moment où la pâte est encore déformable. Il se produit lorsque le flux d'eau évaporée au niveau de la surface est supérieur au flux d'eau ressuée [21]. Gram et al. [48] ont montré que le retrait plastique est deux à trois plus important pour les BAP que les bétons vibrés (Figure 1.13).

Turcry [49] a étudié les différences potentielles de comportement entre BAP et béton ordinaire. Les résultats des mesures du retrait plastique sont présentés sur la Figure 1.14. L'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons ordinaires.

Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP et un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par conséquent,

pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant.

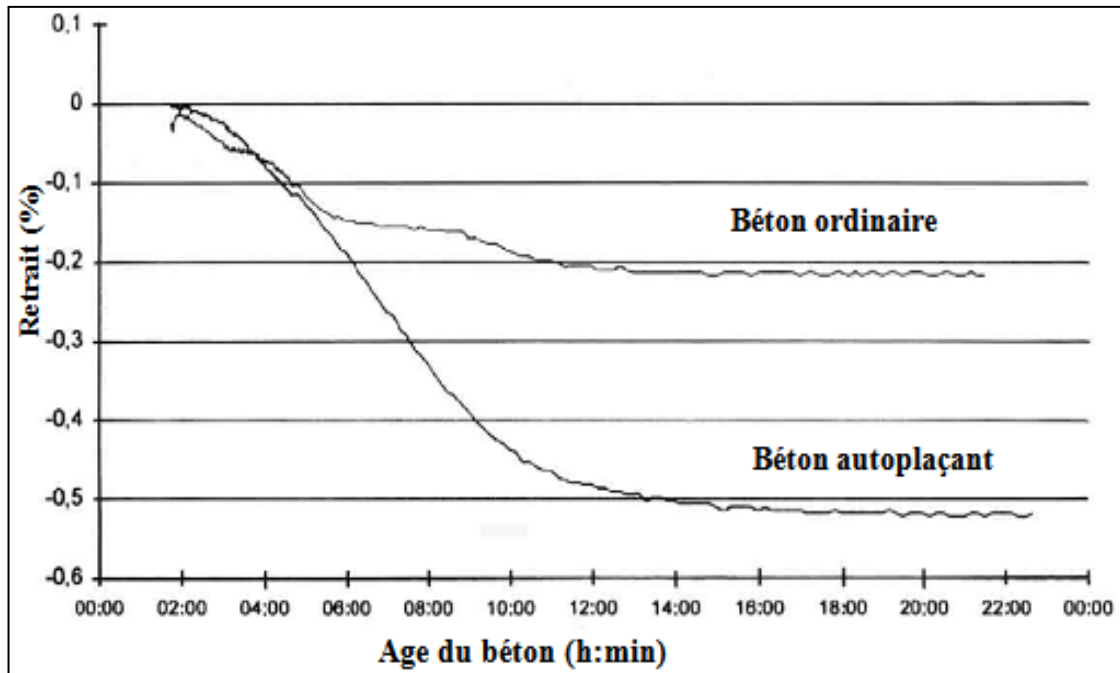


Figure 1.13 : Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure [48].

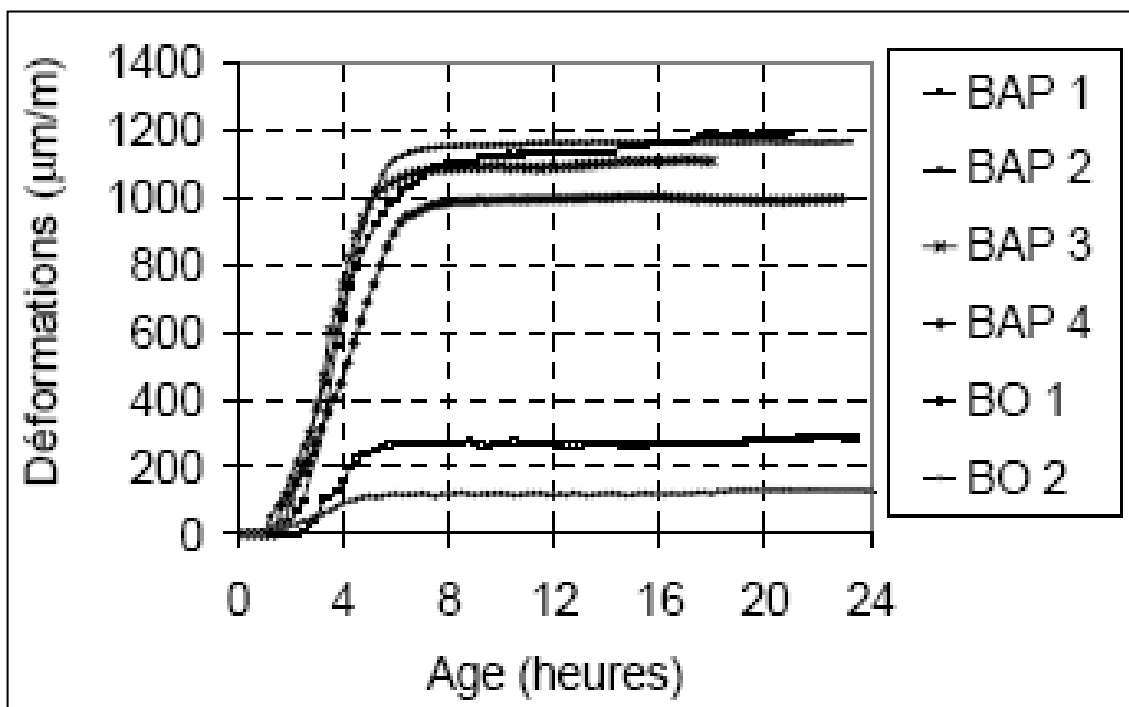


Figure 1.14 : Retrait plastique des formules de BAP et de BO dérivés.

Le retrait plastique élevé des BAP montre l'importance de la protection du séchage des BAP pour des applications horizontales (produit de cure, etc.) afin de contrôler la fissuration plastique qui peut en résulter. Celle-ci est souvent peu nuisible en elle-même mais fournit des amorces de fissures au retrait d'après prise et peut ainsi menacer la durabilité de la structure concernée.

1.11.4 Retrait de séchage (dessiccation)

Le retrait de séchage, ou de dessiccation, est lié au séchage progressif de la pâte de ciment, L'eau contenue dans les pores de la pâte de ciment (l'eau libre) s'évapore vers le milieu ambiant, il survient lorsqu'on abaisse le taux d'humidité interne du béton. C'est la forme la plus courante et la plus visible du retrait.

Le retrait de séchage est d'autant plus important que le rapport E/C est grand mais paraît d'autant plus faible lorsque le rapport G/S est élevé ou le rapport addition/ciment est fort. Il augmente aussi avec le volume de pâte et il n'évolue d'ailleurs plus après 50 jours pour le mortier avec moins de pâte [15].

Güneyisi et al. [50] ont montré que la substitution du ciment par les cendres volantes, le laitier ou le métakaolin réduit le retrait de séchage des BAP alors que l'utilisation de la fumée de silice avec le ciment augmente graduellement le retrait. En outre, plus le niveau de substitution du ciment par les cendres volantes, le laitier ou le métakaolin est grand plus la valeur de retrait est faible. L'effet négatif de la fumée de silice sur le retrait de séchage des BAP a été éliminé dans le cas d'utilisation des liants tertiaires et quaternaires.

1.12 Déformation sous charge (fluage)

Le fluage est caractérisé par une augmentation de la déformation du béton dans le temps, sous l'effet d'une contrainte constante. Les déformations du béton sous charge sont difficiles à analyser car le béton est un matériau possédant une certaine hétérogénéité dont les propriétés évoluent suivant les conditions du milieu. L'étude du phénomène se complique par la superposition d'autres sollicitations dues par exemple aux retraits et aux gonflements.

Le fluage total observé sera la somme de fluage propre et le fluage dû au séchage. Le fluage propre se produit quand le béton est chargé dans les conditions ambiantes constantes (HR = 100%). Le fluage de dessiccation est le fluage additionnel dû à la variation de

l'humidité quand une éprouvette en béton est soumise au séchage et un chargement (compression) [21].

L'intensité de ces déformations est influencée par différents paramètres par la pâte de ciment, le dosage en eau et les granulats (nature, taille et module d'élasticité).

Le fluage du béton est aussi influencé par le temps de chargement, l'humidité relative de l'air ambiant dans lequel est conservé le béton, la température, le taux de chargement (déformations proportionnelles à la charge appliquée), l'âge du béton au moment du chargement et la résistance du béton.

Benkechkeche et Houari [51] ont étudié le comportement différé des poutres de section $10 \times 10 \times 120 \text{ cm}^3$ en BAP sous sollicitation de flexion quatre points. Ils ont trouvé que l'augmentation du volume de pâte, entraînée par l'ajout de fillers supplémentaires, conduit à des déformations différées plus importantes pour les BAP en comparaison en BV dans la même plage de résistance mécanique (Figure 1.15 et 1.16).

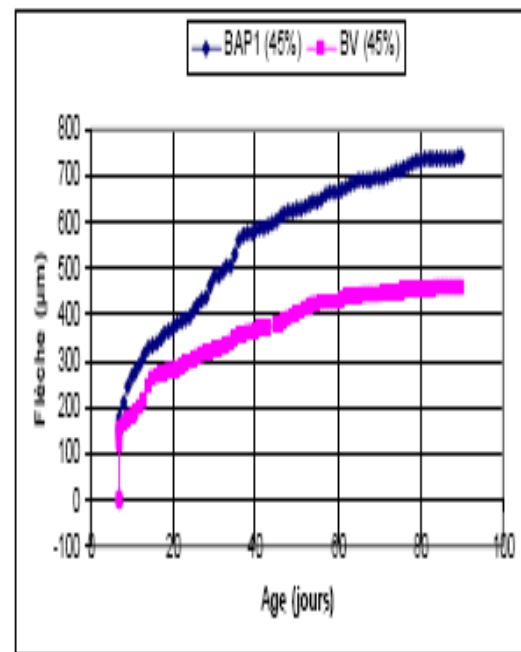
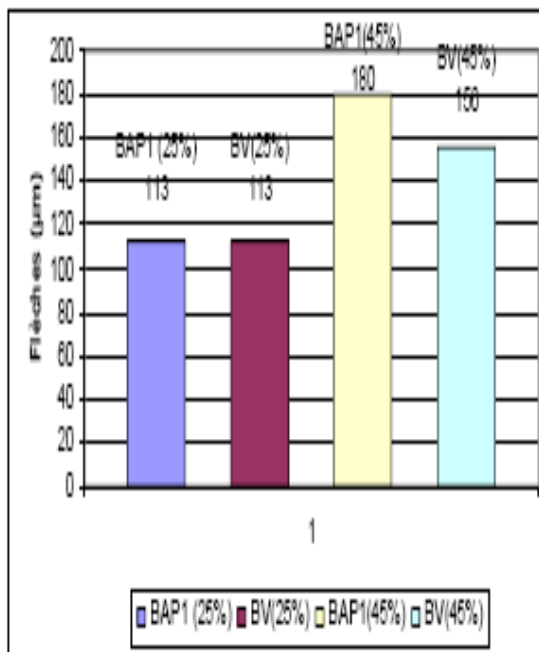


Figure 1.15 : Flèche instantanée : BAP1 et BV.

Figure 1.16 : Fluage total : BAP1 et BV.

En termes d'amplitude et de cinétique, l'influence du rapport filler/liant sur le fluage de BAP est négligeable. Par contre, l'introduction de fibres métalliques semble augmenter les déformations sous charge maintenue (Figure I.17 et I.18).

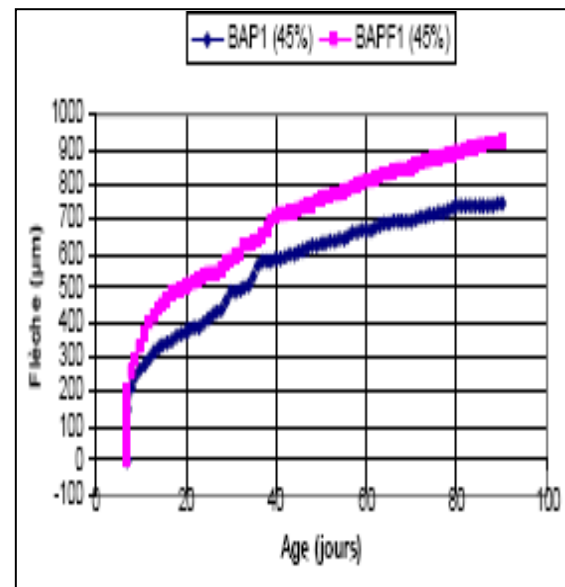
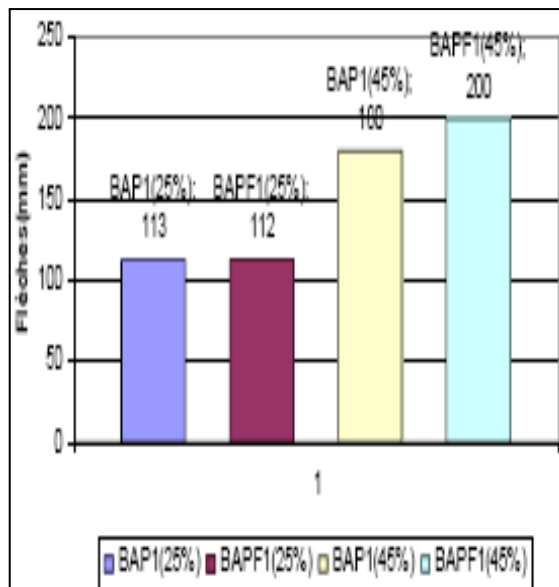


Figure 1.17 : Flèche instantanée : BAP1 et BAPF1. Figure I.18 : Fluage total : BAP1 et BAPF1.

Heirman et al. [27] ont trouvé que les BAP confectionnés avec le ciment CEM I montrent des déformations de fluage plus élevées que celles du BV confectionné avec le même ciment, en raison de leur volume élevé de pâte (Figure 1.19). Cependant, les BAP fabriqués avec un ciment CEM III/A 42.5 N (SCC3) ont montré un faible fluage. Ce résultat est contradictoire avec d'autres travaux qui ont montré que la déformation de fluage est proportionnelle au dosage de laitier. Ceci est probablement dû à l'effet des ciments à durcissement rapide, qui fournissent une rigidité accrue à la matrice du béton, la rendant plus résistante au fluage.

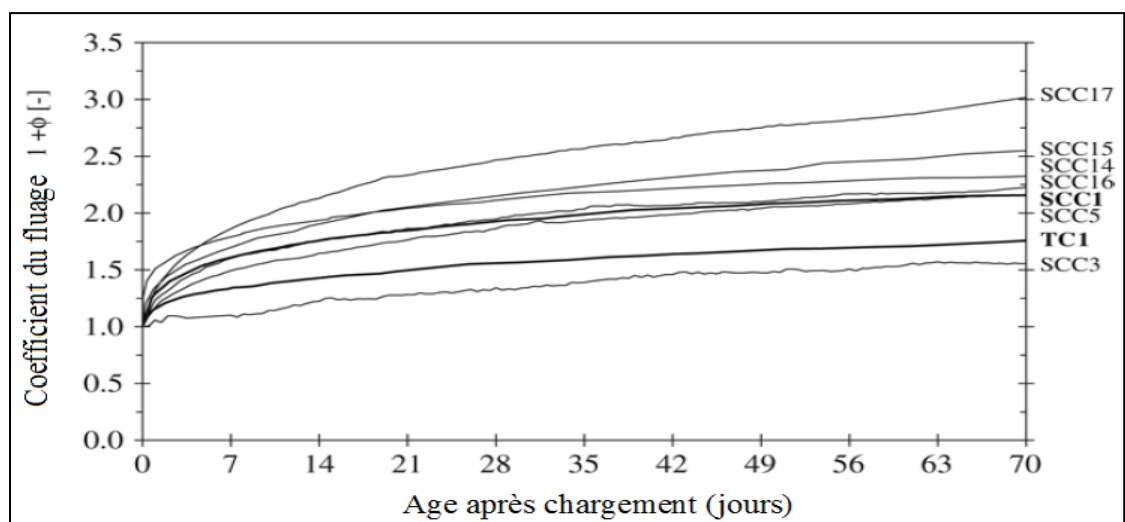


Figure 1.19 : Coefficient de fluage moyen en fonction de l'âge après chargement [27].

1.13 Durabilité

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 différentes façons, mais tous les mouvements dépendent principalement de la structure de la pâte de ciment hydraté. La durabilité du béton dépend largement de la facilité avec laquelle les fluides, à la fois liquides et gaz, peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton sous l'action d'un gradient de pression c'est ce que l'on appelle communément la perméabilité du béton. Cependant, le mouvement des différents fluides dans le béton ne se fait pas seulement par écoulement à travers le réseaux poreux, mais aussi par des mécanismes de diffusion et d'absorption.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant. La durabilité est une propriété qui a été relativement peu étudiée pour les BAP jusqu'à présent. Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation, la résistance aux sulfates et aux acides, la résistance au feu et la résistance au gel - dégel.

1.13.1 Perméabilité aux gaz

La perméabilité de la pâte de ciment hydraté durci est liée à la nature du réseau poreux à l'intérieur même de la pâte de ciment, mais aussi de la zone voisine de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats. La perméabilité du béton n'est pas une fonction simple de sa porosité, mais dépend aussi de la dimension, de la distribution, de la forme, de la sinuosité et de la continuité des pores.

Les pores correspondant à la perméabilité sont ceux dont le diamètre est d'au moins 120 ou 160 nm. Ces pores doivent être continus. Les pores qui ne sont pas importants en ce qui concerne l'écoulement, c'est-à-dire la perméabilité, comprennent, en plus des pores discontinus, ceux qui contiennent de l'eau adsorbé et ceux l'ouverture est étroite, même s'ils ont eux même de gros diamètre.

La dimension des pores dans le béton est directement liée au rapport E/C de la formulation étudiée. En effet, lorsque le rapport E/C augmente, la porosité devient plus grande et la

structure poreuse plus grossière. Les transferts de matières de l'extérieur vers l'intérieur du béton sont alors facilités et la perméabilité du matériau s'amplifie [52].

Le volume de pâte plus important dans les BAP peut a priori être un handicap pour ces bétons mais l'utilisation d'addition minérale est susceptible d'améliorer cette propriété.

D'après Zhu et al. [53] la perméabilité à l'oxygène des BAP est plus faible que celle des bétons vibrés (Tableau 1.2 et Figure 1.20). Les compositions étudiées ont des caractéristiques très proches (quantité de ciment, rapport E/C) et il ressort de ces observations que la diminution de la perméabilité est principalement due à l'utilisation d'additions minérales (filler calcaire et cendres volantes) dans les BAP. Les résultats ont également indiqué que le mélange de BAP qui contient l'agent de viscosité et aucune addition minérale présent la perméabilité à l'oxygène la plus élevée.

Tableau 1.2 : Résultats de coefficient de perméabilité à l'oxygène [53]

Concrete mixes	Average \pm S.D. coefficient of permeability (10^{-17} m^2)	
	C40 mixes	C60 mixes
REF 1	12.8 \pm 0.5	10.4 \pm 0.3
REF 2	13.9 \pm 1.1	5.0 \pm 0.4
SCC 1	5.5 \pm 0.2	4.5 \pm 0.6
SCC 2	4.1 \pm 0.2	2.9 \pm 0.1
SCC 3	8.2 \pm 1.5	7.3 \pm 0.7

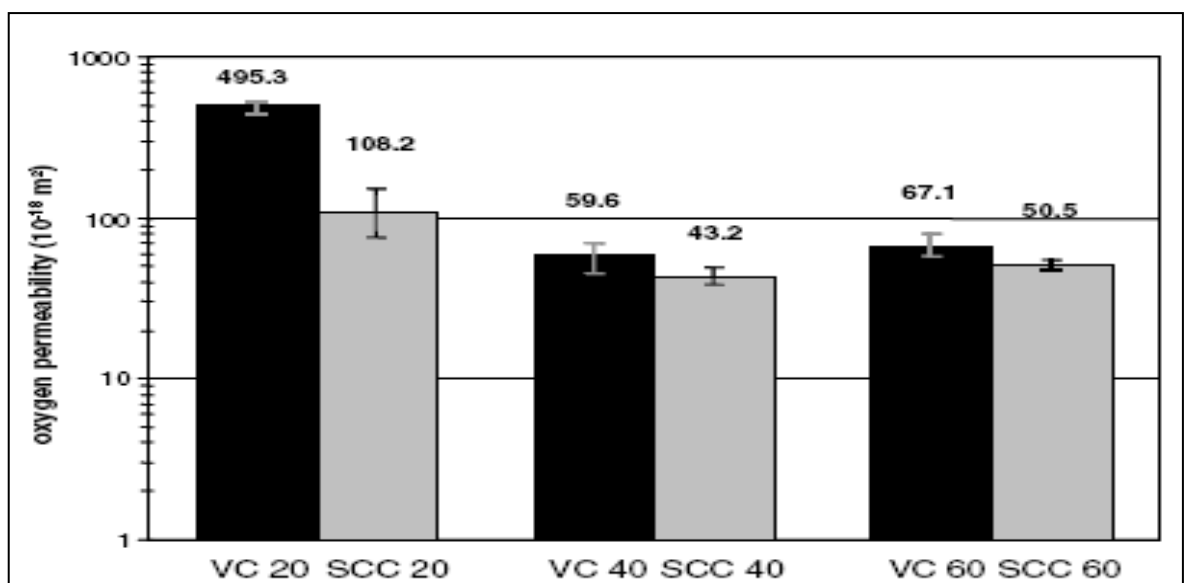


Figure 1.20 : Perméabilité apparente à l'oxygène des bétons étudiés [36].

1.13.2 Diffusion des ions chlore

Les ions chlorures constituent un facteur important de risque pour le béton armé : ils pénètrent, en effet, dans le béton et peuvent provoquer la corrosion des armatures. Ces chlorures, peuvent provenir de diverses sources (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles, des granulats contaminés ou d'adjuvants contenant des chlorures).

Dans les conditions normales, les ions chlorures se retrouvent en quantité suffisante (concentration minimale) 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 des armatures. Il y a dépassivation de l'acier et le phénomène de corrosion peut alors commencer.

En présence de trop d'ions chlorures dans le béton, la corrosion des aciers est observée (Figure 1.21). Ils modifient la morphologie de la couche passive en donnant des ions FeCl^{-3} ou FeCl_2 ($\text{Fe} + 3\text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_3 + 2e^-$ ou/et $\text{Fe}^{+2} + 2\text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_2$) qui consomment les ions OH^- présents ($\text{FeCl}_3 + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 3\text{Cl}^-$ ou/et $\text{FeCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{HCl}$).

Les électrons libérés par la réaction d'oxydation se déplacent à travers le métal jusqu'aux sites cathodiques. D'après les réactions précédentes, le processus conduit à une diminution du pH et à un recyclage des ions chlore.

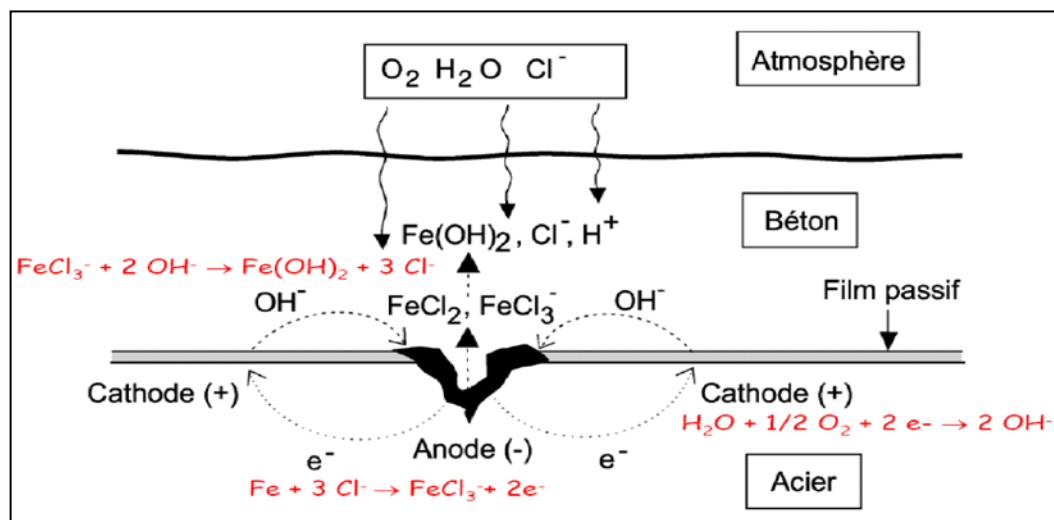


Figure 1.21 : Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence de chlorures [54].

Plusieurs auteurs, ont montré que la résistance à la pénétration des ions chlore est très influencée par le type d'addition minérale employé dans le béton. Zhu et al. [55] ont observé que les BAP formulés avec (SCC1) ou sans filler calcaire SCC3 et le béton vibré (REF1) présentent des coefficients de migration des ions chlore similaires, avec une valeur légèrement plus faible pour celui formulé avec un filler calcaire (Figure 1.22). Ces auteurs ont constaté également que l'emploi de cendres volantes diminue considérablement le coefficient de migration de ces bétons (REF2 et SCC2).

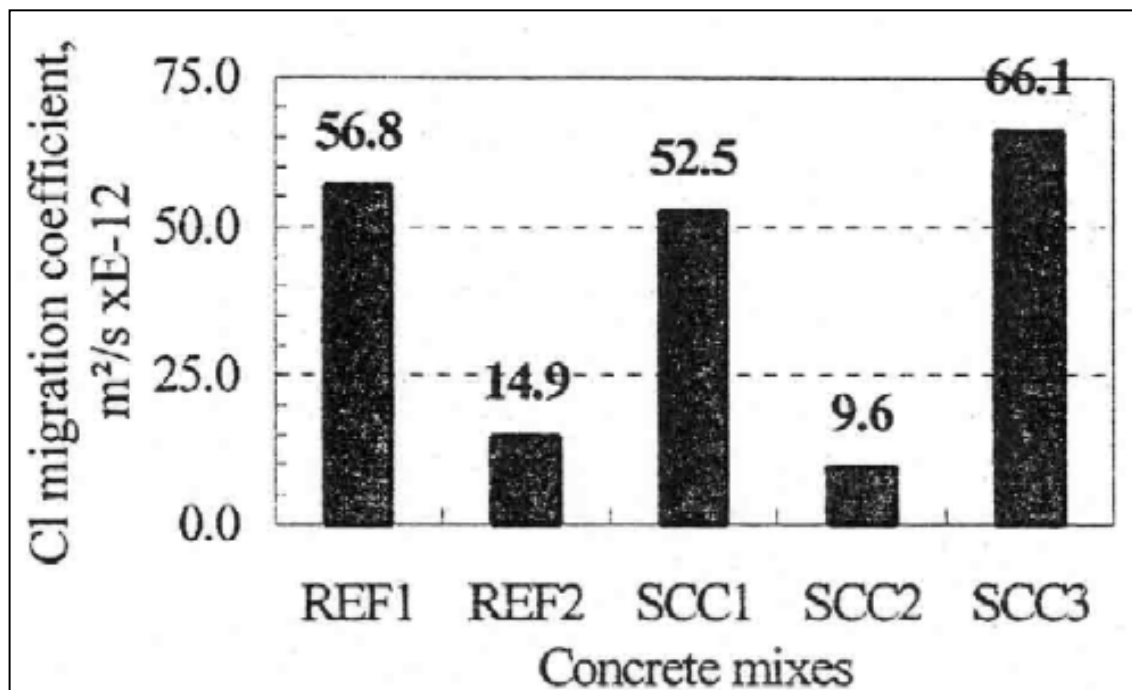


Figure 1.22 : Coefficient de migration des ions chlore [55].

La réduction significative de diffusivité de chlorure de BAP avec cendres volantes a été également étudiée par Dinakar et al. [56]. Ils ont évalué le comportement de huit mélanges de BAP à base de différents pourcentages de cendres volantes (classe F) de 0, 10, 30, 50, 70 et 85% et cinq mélanges différents des bétons vibrés soumis à un essai de migration les ions chlore sous un champ électrique (Figure 1.23).

Tous les BAP à base de cendres volantes (exception SCC 558) ont donné une charge totale de moins de 1000 coulombs classant ainsi ces bétons comme des bétons de très faible perméabilité selon l'ASTM C 1202.

Par contre, les bétons vibrés correspondants ont montré des valeurs faibles à modérées. Les valeurs de diffusion de chlorure obtenues pour les BAP de classes 20, 30 et 60 MPa, avec un taux de cendres volantes de 85, 70 et 50% respectivement, étaient environ 2 à 8 fois moins perméable que les bétons vibrés correspondants. Les bétons avec des taux de cendres volantes de 30 et à 10% sont presque semblable aux bétons vibrés. Cependant, Assie et al. [36] ont conclu que le comportement des BAP est équivalent aux bétons vibrés vis-à-vis du mécanisme de diffusion des ions chlorures (Figure 1.24).

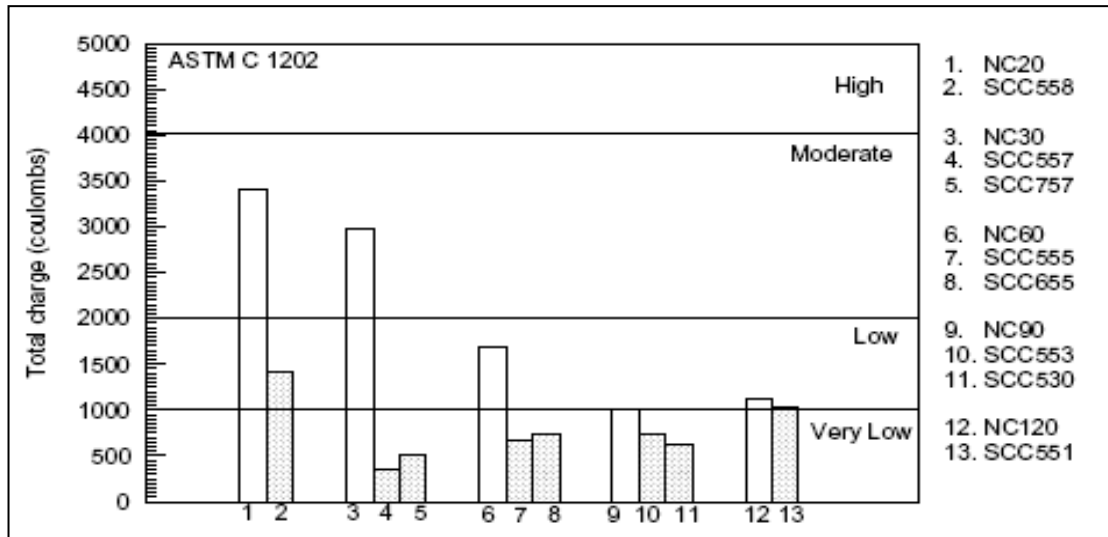


Figure 1.23 : Valeurs de perméabilité des ions chlore des bétons étudiés [56].

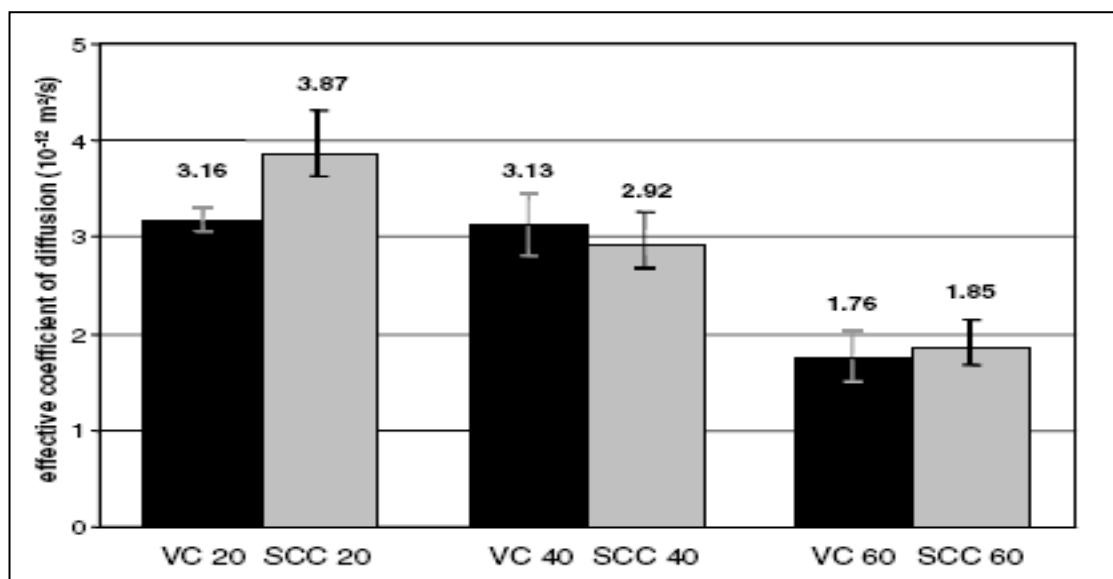


Figure 1.24 : Coefficient efficace de diffusion de chlorure des bétons étudiés [36].

Nehdi et al. [57] ont trouvé que les BAP avec ciment tertiaire et quaternaire ont de très faibles valeurs de pénétration des ions de chlore par rapport au BAP de référence formulé avec un ciment portland sans ajouts (Figure 1.25). Les ajouts utilisés sont le laitier de hauts fourneau, cendres volantes de classe F, fumée de silice et enfin les cendres de riz (noté par RHZ).

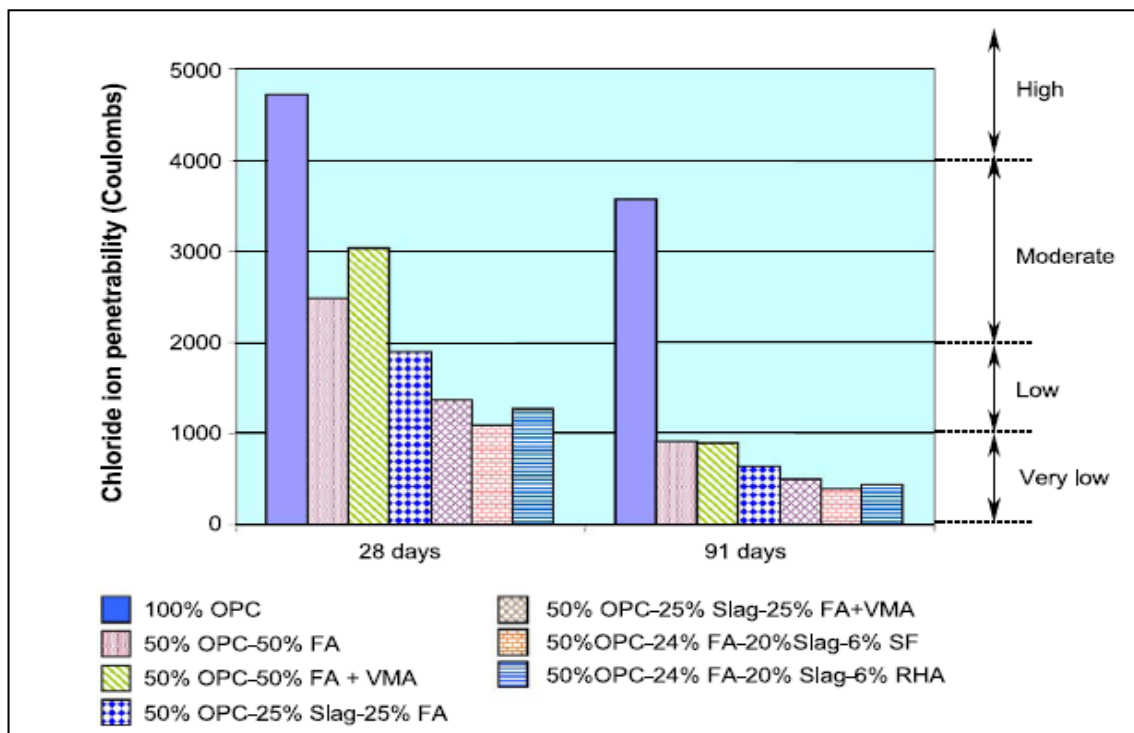


Figure 1.25 : Pénétration d'ions chlorure à 28 et 91 jours pour les différents mélanges des BAP [57].

Selon Guneyisi et Gesoglu [58] les bétons au laitier, surtout dans le cas de dosage élevé en laitier (plus que 50%), ont une perméabilité aux ions chlore remarquablement faible par rapport aux bétons sans laitier.

Chimiquement, il résiste mieux tant à l'action destructrice des sulfates, qu'à la dissolution de la chaux par les eaux pures ou chargées de certains sels, ainsi que par celles contenant du gaz carbonique agressif. Les avantages de la substitution du ciment par du laitier sont également confirmés par d'autres études sur des pâtes de ciment Portland pur et de ciment Portland avec 33, 50 et 67% de laitier (à $E/C = 0,55$). Ils ont constaté qu'une augmentation de la quantité de laitier conduit à une diminution du coefficient de diffusion [59].

1.13.3 Absorption capillaire

L'absorption est le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. La plupart des bons bétons ont une absorption bien inférieure à 10% en masse [11].

Comme pour les propriétés de transfert déjà mentionnées (perméabilité et diffusion), la formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait entraîner une absorption d'eau différente de celles des bétons vibrés.

La Figure 1.26 montre que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés dans la même plage de résistance mécanique, et elle est d'autant plus faible avec l'augmentation des fillers calcaires ou des cendres volantes.

Cependant, d'autres chercheurs ont trouvé que l'absorption d'eau par capillarité des BAP et des BV ne diffère pas de manière significative (Figure 1.27).

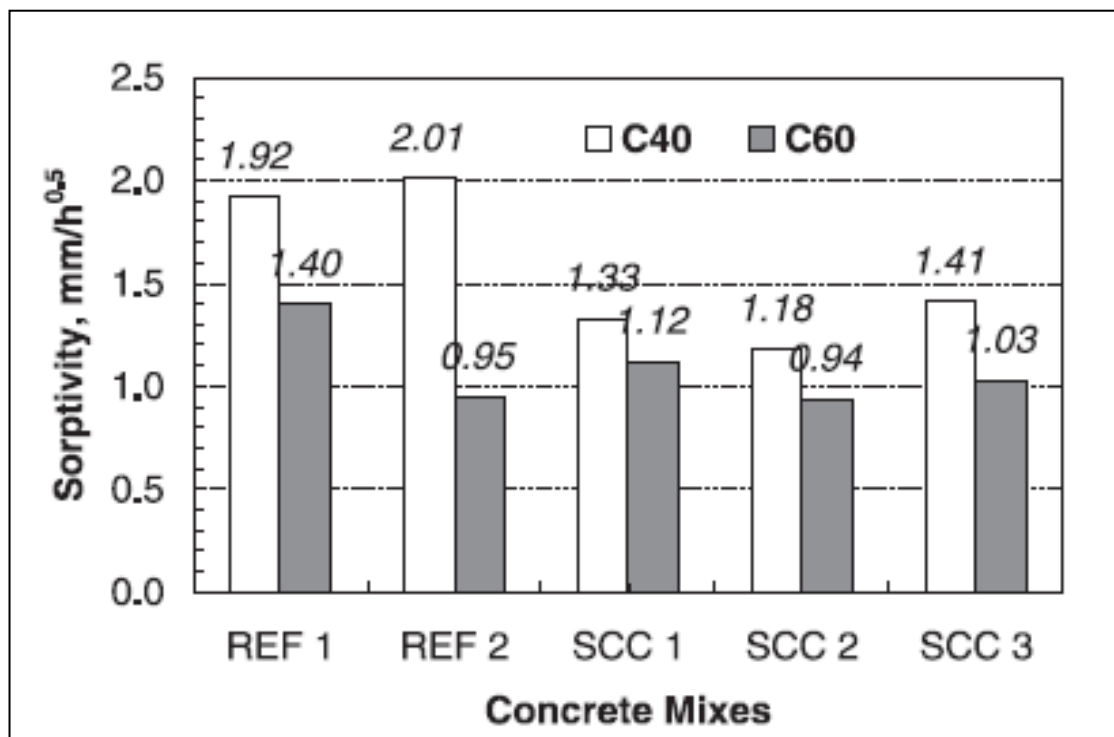


Figure 1.26 : Résultats l'absorption d'eau par capillarité des bétons étudiés [53].

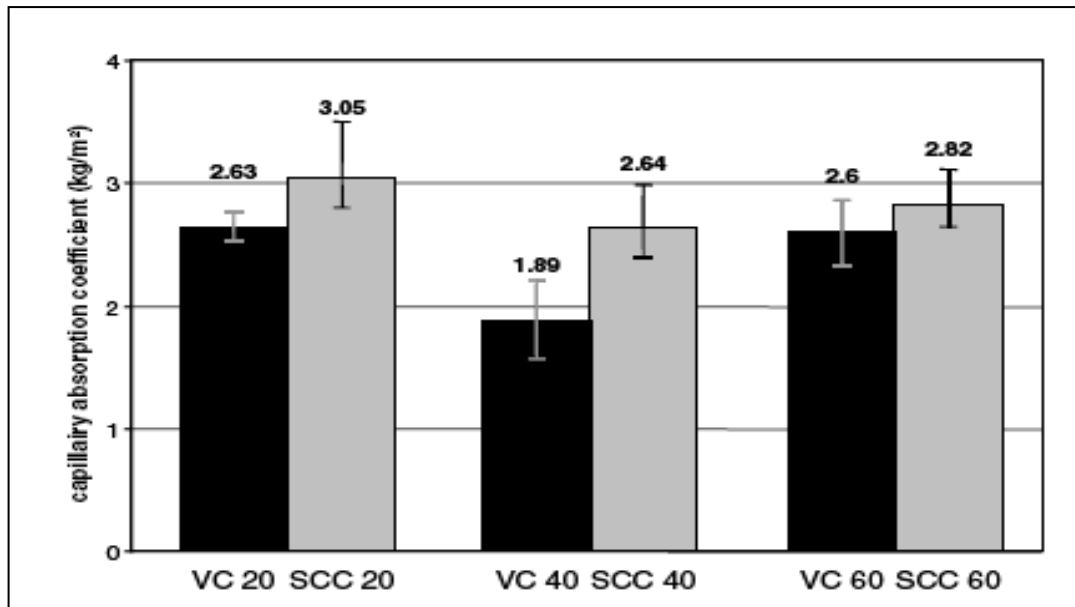


Figure 1.27: Coefficient d'absorption capillaire (à 24 h) des bétons étudiés [36].

Liu [60] a étudié l'influence de substitution de ciment par les cendres volantes jusqu'à 80% sur l'absorption d'eau des BAP (Figure 1.28). Il a trouvé que le mélange avec 40% de cendres volantes présente l'absorptivité la plus faible. Ceci est expliqué par un remplissage efficace des pores par les cendres volantes et par conséquent la diminution de la porosité de béton. À partir de 40% de substitution de cendres volantes, l'absorptivité des mélanges augmente de manière significative.

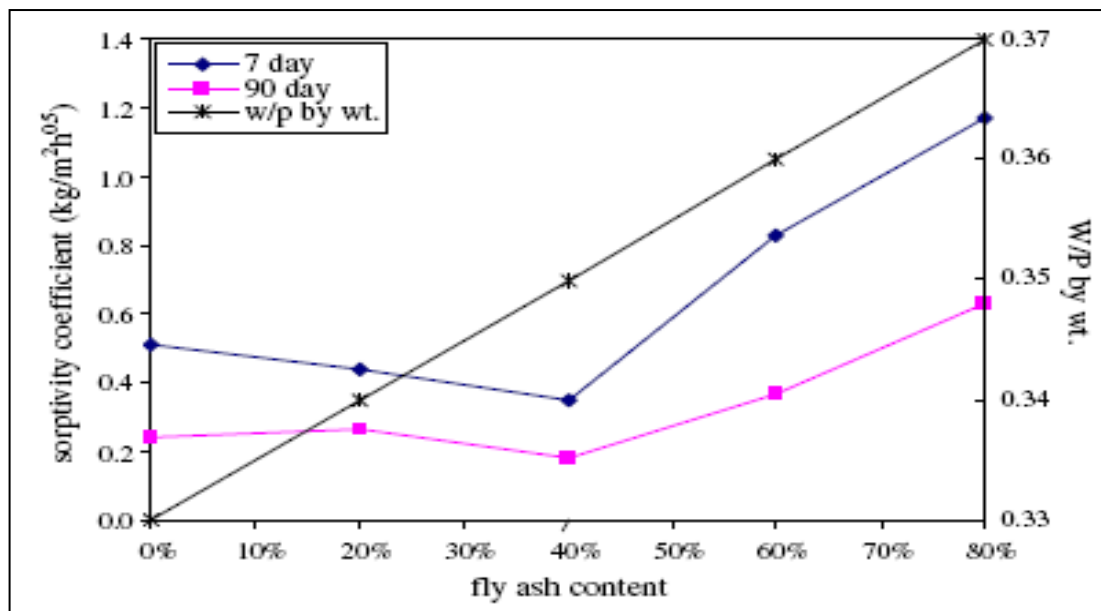


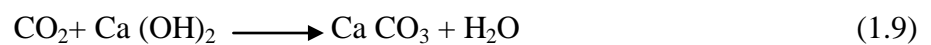
Figure 1.28: Influence des cendres volantes sur l'absorptivité [60].

Selon Guneyisi et Gesoglu [58], les caractéristiques de l'absorption d'eau du béton diminuent avec l'augmentation du dosage en laitier indépendamment des conditions de cure et de l'âge. Par contre, les différences dans ces caractéristiques, entre le béton avec et sans laitier deviennent plus significatives à cause de la méthode de cure après 28 jours et sont remarquablement plus faible pour le béton au laitier.

I.13.4 Carbonatation

L'air contient du CO₂ qui, en présence d'humidité, réagit avec le ciment hydraté. L'action du CO₂ se manifeste même à de faibles concentrations comme celles que l'on retrouve dans l'air en milieu rural, où la teneur en CO₂ est d'environ 0,03% en volume d'air.

Lorsque le dioxyde de carbone se déplace à travers le réseau poreux dans la pâte de ciment durci, en présence d'humidité, la réaction suivante se produit :



L'un des effets de cette réaction est le retrait de carbonatation. En ce qui concerne la durabilité, l'importance de la carbonatation réside dans le fait qu'elle réduit le pH de la solution interstitielle dans la pâte durci de ciment Portland qui passe d'une valeur de l'ordre de 12,6 à 13,5 à une valeur d'environ 9. Si ce front de carbonatation progresse jusqu'à la surface des armatures, la couche protectrice de passivation des aciers (nécessitant un pH élevé) disparaît et la corrosion peut se produire, à condition que l'oxygène et l'humidité nécessaire à la corrosion soient présents. Pour cette raison, il est important de connaître la profondeur de carbonatation.

La carbonatation peut avoir quelques effets positifs, puisque la CaCO₃ occupe un volume plus important que le Ca(OH)₂ qu'il remplace, la porosité du béton carbonaté est réduite. De plus l'eau libérée par le Ca(OH)₂ lors de la carbonatation peut contribuer à l'hydratation du ciment anhydre.

Parmi les facteurs influençant la carbonatation et sa vitesse de propagation, certains sont d'ordre intrinsèque au béton et d'autres relatifs aux conditions environnementales. Citons, le rapport E/C (lié à la microstructure et au réseau poreux), la teneur en CO₂, le taux d'humidité, la température et surtout la période de mûrissement.

Valcuende et Parra [61] ont étudié la profondeur de carbonatation à différents âges de deux types de bétons, BAP et béton vibré. Quatre mélanges différents ont été conçus pour

chaque type de béton, trois rapport de E/C : 0,45, 0,55, et 0,65 et deux types de ciment (32.5N et 42.5R) ont été utilisé. Ils ont observé que le coefficient K de carbonatation moyen aux âges de 9 et 42,5 mois est inversement proportionnel à la résistance à la carbonatation du béton (Tableau 1.3). La comparaison entre BAP et bétons vibrés a montré que le taux de carbonations est inférieur dans le BAP en raison de la faible porosité et de la structure des pores plus fine.

Dans le BAP et le béton vibré, la profondeur de carbonatation est réduite en fonction de la diminution le rapport E/C (Figure 1.29).

Tableau 1.3 : Résultats d'essai de carbonatation [61]

Mix	Carbonatation depth (mm)		Carbonation coefficient K (mm/month ^{0.5})
	Age : 9 months	Age : 42.5 months	
S-65-32	6.4 (3.9)	12.1 (3.4)	1.99 (9.2)
S-55-32	4.5 (8.4)	9.3 (4.2)	1.47 (2.9)
S-55-42	2.8 (13.6)	6.7 (5.7)	0.99 (5.7)
S-45-42	1.2 (22.7)	4.0 (13.5)	0.51 (29.4)
N-65-32	7.1 (5.2)	16.5 (12.1)	2.45 (5.5)
N-55-32	5.0 (9.4)	11.2 (7.9)	1.69 (2.5)
N-55-42	3.5 (11.1)	8.4 (8.0)	1.23 (7.4)
N-45-42	1.8 (19.1)	4.9 (17.1)	0.66 (18.7)

Les nombres entre parenthèses sont les coefficients de variation (%).

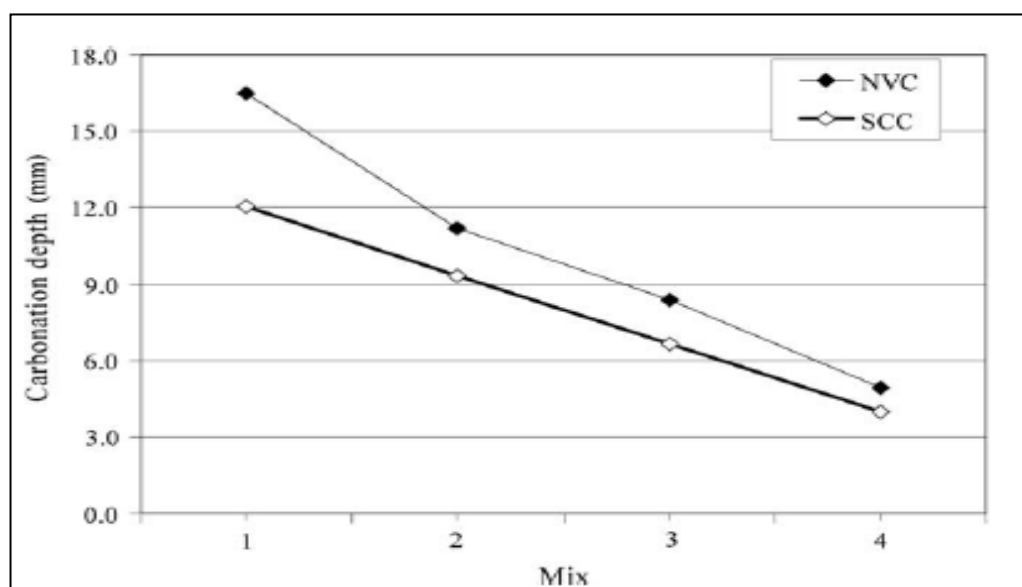


Figure 1.29 : Profondeur de carbonatation à l'âge de 42,5 mois [61].

Au même rapport E/C (les mélanges 2 et 3), utilisant des ciments à résistance à la compression plus élevée donnent une plus grande résistance à la carbonation. La réduction du coefficient de carbonation est en moyenne de 32,7% dans le BAP et 27,2% dans béton vibré. Cette amélioration est également due à la structure poreuse plus dense.

La Figure 1.30, indique que pour toutes les classes de résistance mécanique, les BAP se carbonatent légèrement plus vite que les bétons vibrés. Cependant, les profondeurs de carbonatation de ces bétons sont acceptables pour de telles classes de résistance (20, 40 et 60 MPa) c'est-à-dire moins de 25 mm après 28 jours d'essai (qui seraient atteints après 40 ans en conditions normales) pour la classe 20 MPa et moins de 10 mm à 56 jours d'essai (qui seraient atteints après 200 ans en conditions normales) pour les classes 40 et 60 MPa.

Le taux de carbonatation des deux types de béton reste comparable à résistance équivalente.

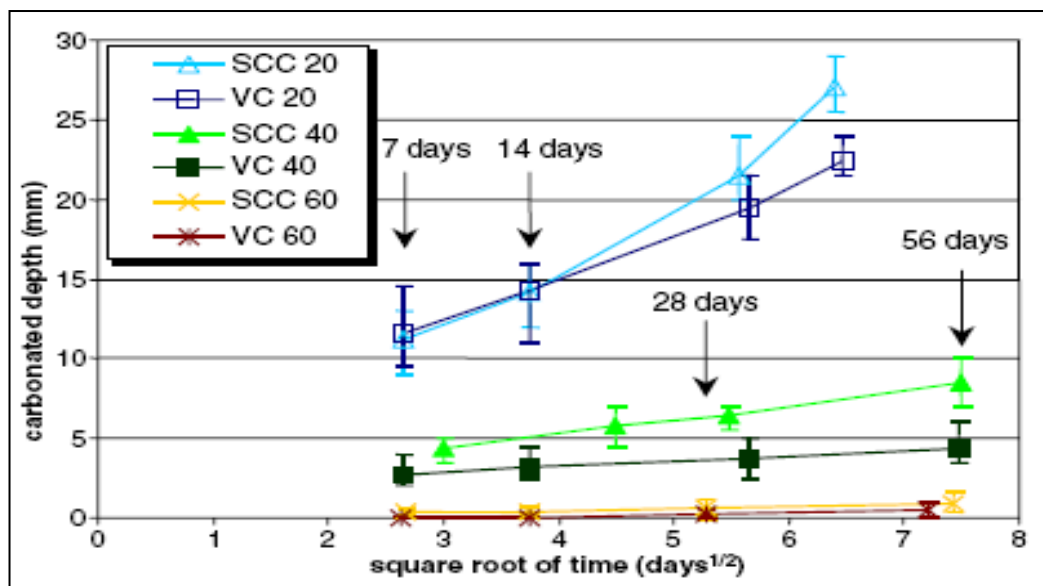


Figure 1.30 : Profondeur de carbonatation des bétons étudiés [36].

1.13.5 Résistance aux sulfates et aux acides

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle (eaux souterraines), biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle. Sulfate de sodium, de potassium, de magnésium et calcium sont très fréquemment trouvés dans les sols et les eaux souterraines. Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physicochimiques. Premièrement, l'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs, ces expansions peuvent causer des dommages structuraux considérables

et la deuxième, perte de résistance est une perte de masse du béton en surface (perte des propriétés liantes des C-S-H).

Persson [16] a comparé la performance du BAP sous l'effet d'une solution du sulfate de sodium, de l'eau de mer et l'eau distillé avec le béton vibré en présence de filler calcaire. Les résultats ont montré une grande perte de masse sous l'effet de sulfates pour les BAP en comparaison au BV à cause de la présence de fillers calcaire dans le BAP. Par contre, l'eau de mer et l'eau distillée n'ont pas affecté la perte de masse.

Dinakar et al. [56] ont montré que la détérioration du béton soumise à une solution de 3% de H_2SO_4 (la perte de poids) diminue de manière significative avec l'augmentation du pourcentage de substitution de cendres volantes dans les BAP.

1.13.6 Résistance des bétons à la lixiviation

La lixiviation concerne un grand nombre d'ouvrages et de produits en béton : réseaux de stockage et traitement des eaux potables, usées et pluviales, ouvrages hydrauliques (notamment en haute montagne), stockage des déchets radioactifs et bétons en milieu agricole.

Le phénomène de lixiviation est d'autant plus intense que l'eau en contact avec le béton est peu minéralisée et acide. La dégradation se propage à partir de la surface et se traduit par une baisse du pH, une augmentation de la porosité, une dégradation des propriétés mécaniques, et une augmentation des propriétés de transfert susceptible d'amplifier les éventuelles dégradations couplées. Ce phénomène concerne bien la pâte, le volume de pâte et la nature des granulats sont des facteurs d'augmentation ou de réduction du risque pour les bétons exposés à la lixiviation.

La lixiviation simple due à l'action dégradante de l'eau déminéralisée seule sur un matériau immergé est prise comme référence. Cependant, la lente cinétique de dégradation de cette réaction pose un problème de durée d'essai. Pour obtenir une attaque plus rapide, sans pour autant modifier la nature et la hiérarchie des phénomènes à l'origine de la dégradation des hydrates (ni former des phases expansives qui altéreraient la matrice cimentaire), plusieurs solutions d'attaque de remplacement ont donc été envisagées. Le nitrate d'ammonium a été retenu et utilisé pour accélérer les phénomènes de dégradation (cinétique d'attaque multipliée par 100 par rapport à la lixiviation simple) [62]. Ce composé soluble permet d'obtenir une épaisseur dégradée importante et relativement

constante par rapport à l'hétérogénéité du matériau dans des temps expérimentaux raisonnables.

Assie [45] a montré que la cinétique de lessivage au nitrate d'ammonium de BAP et BV restent à résistance équivalente comparables (Figure 1.31). Ces résultats semblent logiques puisque le lessivage au nitrate d'ammonium est principalement dirigé par le mécanisme de diffusion et d'absorption et il a été montré que les coefficients de diffusion et d'absorption entre BAP et BV étaient équivalents.

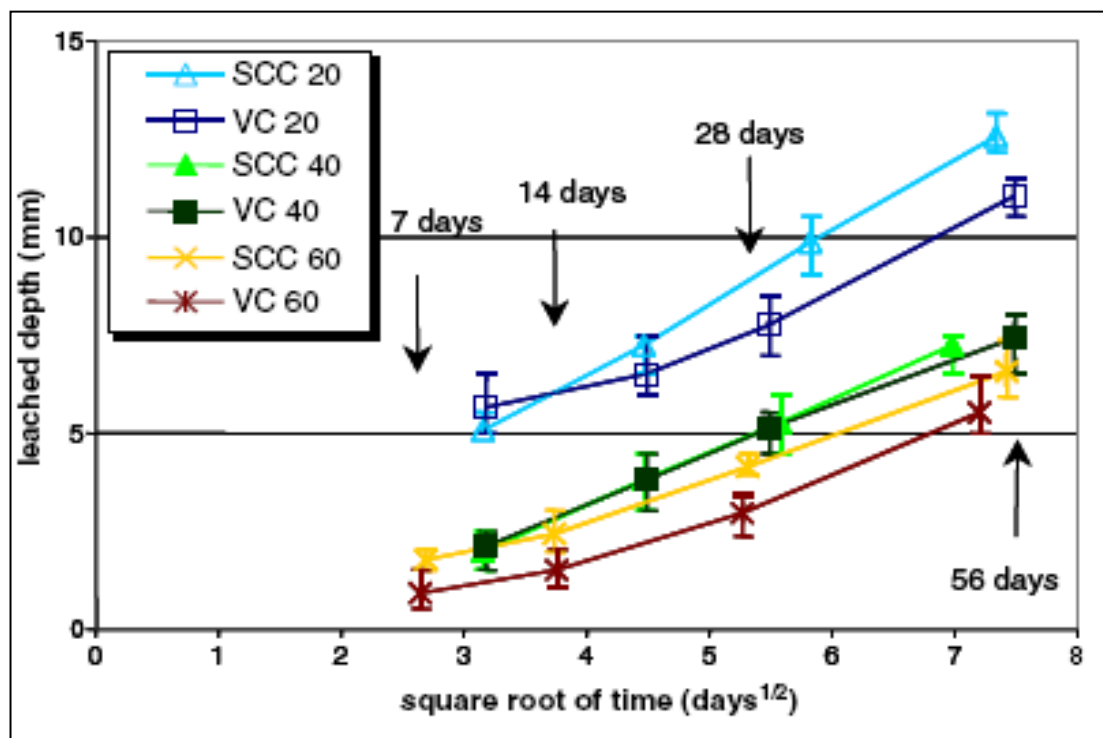


Figure 1.31 : Profondeur carbonatée des bétons étudiés [45].

1.13.7 Les cycles de gel-dégel

L'action des cycles de gel-dégel produit deux principaux types de détériorations du béton, la fissuration interne et l'écaillage des surfaces. Ces deux types de dégradations ont pour origine des processus différents et ne surviennent pas nécessairement en même temps lorsque les bétons sont exposés aux cycles de gel-dégel.

La pression de dilatation induit par le gel se produit principalement par deux source premièrement, la transformation de l'eau en glace entraîne une augmentation de volume d'environ 9%. Par conséquent, l'expulsion d'une certaine quantité d'eau du pore où la glace est formée. La deuxième force de dilatation due au gel provient de la diffusion de

l'eau qui entraîne la croissance d'un nombre relativement faible de cristaux de glace. Cette diffusion est due aux pressions osmotiques engendrées par l'augmentation locale de la concentration en sels dissous survenant lors de la séparation de l'eau gelée du reste de l'eau des pores. Chaque cycle de gel provoque une migration de l'eau vers les zones où elle peut geler. Ces zones de gel comprennent de fines fissures qui s'élargissent sous l'effet de la pression de la glace et ne se referment pas lors du dégel, puis elles se remplissent d'eau. A chaque nouveau cycle de gel-dégel se répète l'évolution de la pression qui contribue à aggraver les désordres [11].

La résistance au gel-dégel du béton dépend de différentes propriétés (résistance de la pâte de ciment durci, fluage, déformabilité), mais elle dépend surtout du taux de saturation de la pâte de ciment durci et des caractéristiques de son réseau poreux. L'influence générale du degré de saturation est illustrée à la Figure 1.32 ; en deçà d'une valeur critique de saturation, le béton est très résistant au gel et le béton sec n'est nullement affecté.

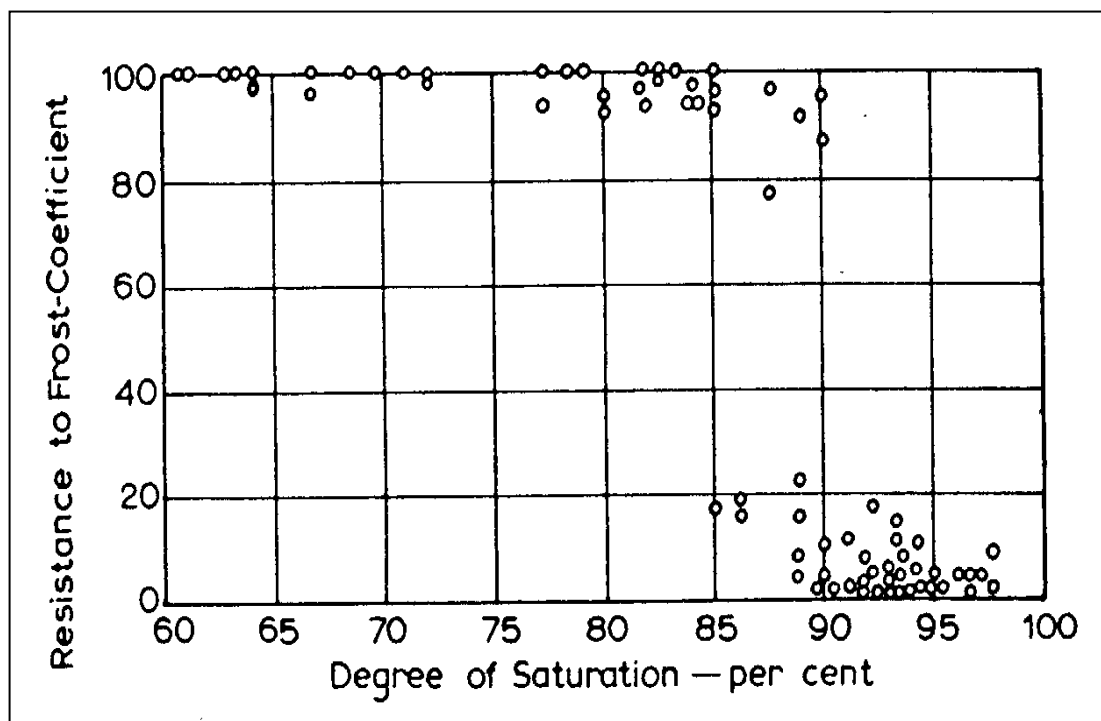


Figure 1.32 : Influence de la saturation du béton sur sa résistance au gel [1].

Persson [63] a étudié la résistance d'écaillage des surfaces extérieures des mélanges de BAP formulé avec : cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire. Il n'a observé aucune différence entre le BAP et le béton ordinaire vis-à-vis de la résistance d'écaillage.

D'autres chercheurs ont étudié des BAP à base de ciment binaire, ternaire ou quaternaire et ont confirmé la performance comparable des BAP vis-à-vis la résistance à l'écaillage [57,64]. La Figure 1.33 illustre bien ce comportement.

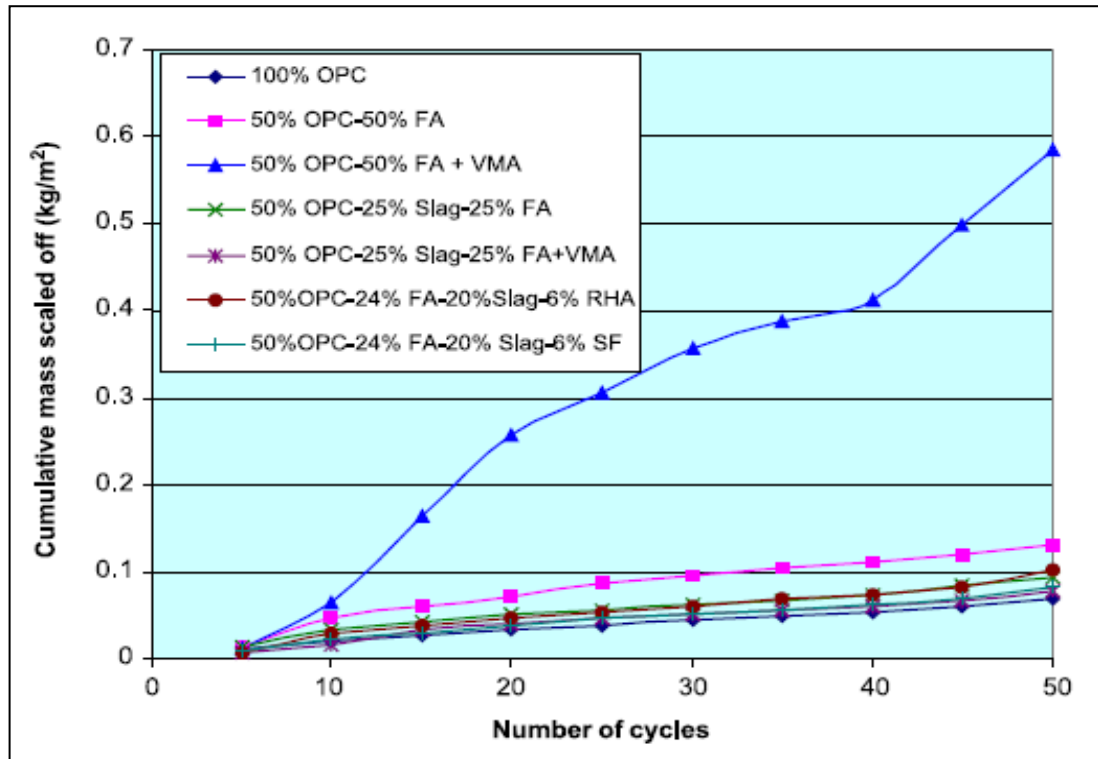


Figure 1.33 : Résultats d'essais de résistance au gel-dégel d'un BAP (essai d'écaillage) [57].

Vejmelková et al. [65] ont étudié l'influence du laitier de haut fourneau et le métakaolin sur la résistance des BAP au gel par l'évaluation de la perte de masse. Les résultats (Tableau 1.4) ont montré que le BAP-M (à base de métakaolin) ne présente pas de perte de masse jusqu'à 56 cycles de gel-dégel. Pour le BAP-S (à base de laitier) la perte de masse était de $0,396 \text{ kg/m}^2$ après 56 cycles montrant ainsi une bonne résistance au gel-dégel.

Tableau 1.4 : Résistance au gel en termes de perte de masse (kg/m^2) [66]

Material	Number of cycles			
	14	28	42	56
SCC-S	0.205	0.323	0.356	0.396
SCC-M	0	0	0	0

1.13.8 Résistance au feu

Le béton a une bonne résistance au feu. Les critères correspondants de performance sont : la résistance à la pénétration des flammes et la résistance à la transmission de la chaleur. Les résultats des essais effectués pour établir l'effet d'une exposition à une température élevée, jusqu'à environ 600 °C, donnent des résultats très variés. Les raisons en sont ; des différences de l'état de contrainte et de l'état d'humidité du béton au moment du chauffage et des différences dans les propriétés des granulats. L'état d'humidité est aussi un facteur important dans le comportement structural à des températures élevées. Un des changements qui apparaît lorsque la température augmente jusqu'à environ 400 °C est la décomposition de l'hydroxyde de calcium, après refroidissement l'eau pénètre dans le béton, la ré-hydratation de la chaux peut être perturbatrice. De ce point de vue, l'ajout de pouzzolanes dans le béton est bénéfique, car il élimine la présence d'hydroxyde de calcium.

Fares et al. [67] ont étudié l'effet de température élevée sur les propriétés physico-chimiques de deux BAP de résistance différents et un béton vibré de résistance proche de celle des deux BAP. Le béton a été chauffé à 1°C / min jusqu'à 150, 300, 450 et 600 °C et après, la température a été maintenue constante pendant 1 heure pour assurer une température uniforme. Après le traitement thermique, la perte de masse, la porosimétrie à l'eau ainsi que la perméabilité ont été menées. La perte de masse observée en fonction de la température est donnée sur la Figure 1.34. On distingue trois phases identiques pour les BAP et le BV concernant la perte de masse. La première phase, commençant à 20 °C jusqu'à 150 °C, est liée essentiellement au départ de l'eau libre. Entre 150 et 300 °C, une accélération de la perte de masse remarqué qui se caractérise par la déshydratation des hydrates comme les C-S-H. Au-delà de 300 °C c'est la dernière phase de perte de masse qui est associée à la déshydroxylation de la portlandite.

Les modifications physico-chimiques conduisent à l'augmentation de la porosité et de la perméabilité. 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 micro-fissuration.

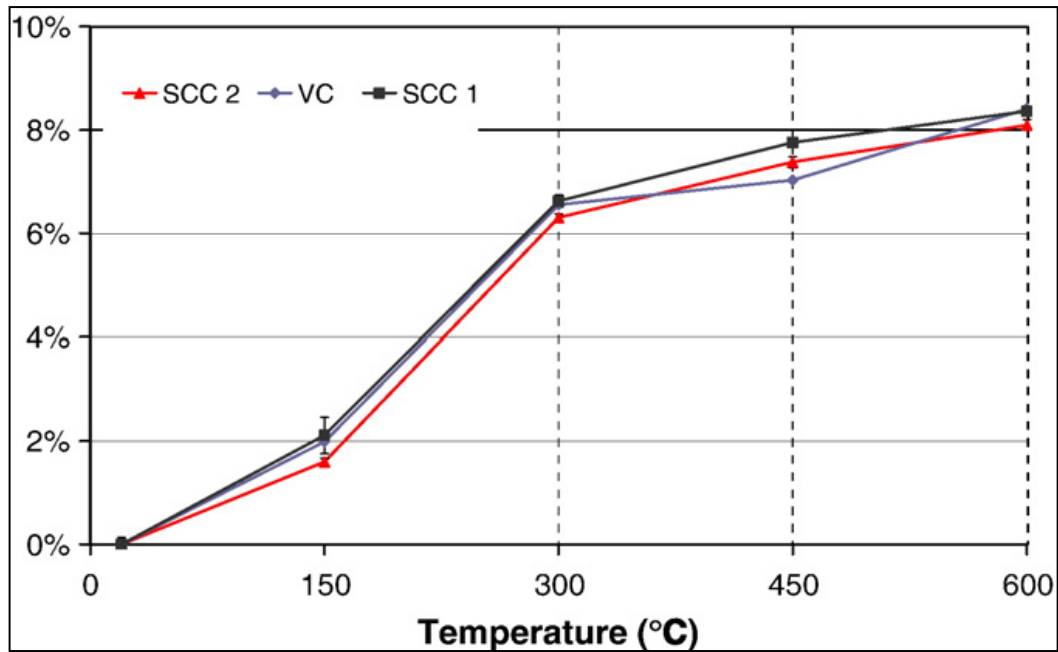


Figure 1.34 : Perte de masse de béton en fonction de la température [67].

Liu et al. [68] ont montré que les fibres de polypropylène (FPP) diminuent la porosité des BAP (Tableau 1.5).

L'explication donnée est relative à la décomposition des hydrates et à l'accroissement des pores ou à la création des fissures due à la pression de pores. En effet, après la fusion des fibres, il reste des canaux qui relient les pores non connectés.

Une tendance similaire a été observée pour la perméabilité (Tableau I.6).

Tableau 1.5 : Evolution de la porosité [68]

BAP	Porosité (%)				
	130 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
0% FPP	10,7	14,1	15,5	17,2	-
0,5% FPP	11,6	13,9	15,3	17,4	22,1
1% FPP	10,6	14,2	15,5	17,3	20,2

Tableau 1.6 : Evolution de la perméabilité de BAP [68]

BAP	Perméabilité ($m^2 \times 10^{-15}$)					
	105 °C	130 °C	200 °C	300°C	400 °C	500°C
0% FPP	0,5	0,4	0,2	0,6	2,2	-
0,5% FPP	0,5	0,4	1,4	2,4	2,8	3,0
1% FPP	0,4	0,4	2,4	3,6	4,2	5,2

Fares et al. [67] ont constaté que pour tous les mélanges du béton, il y a une augmentation monotone et plutôt uniforme de la porosité avec la température (Figure 1.35). Entre 300 et 450 °C, la porosité a augmenté fortement pour le BAP 2 (une augmentation de 4% en moyenne) tandis que l'augmentation était beaucoup modérée pour les deux autres bétons (environ 1%). Au delà du 450°C, les écarts type sont importants parce que les échantillons deviennent très friables.

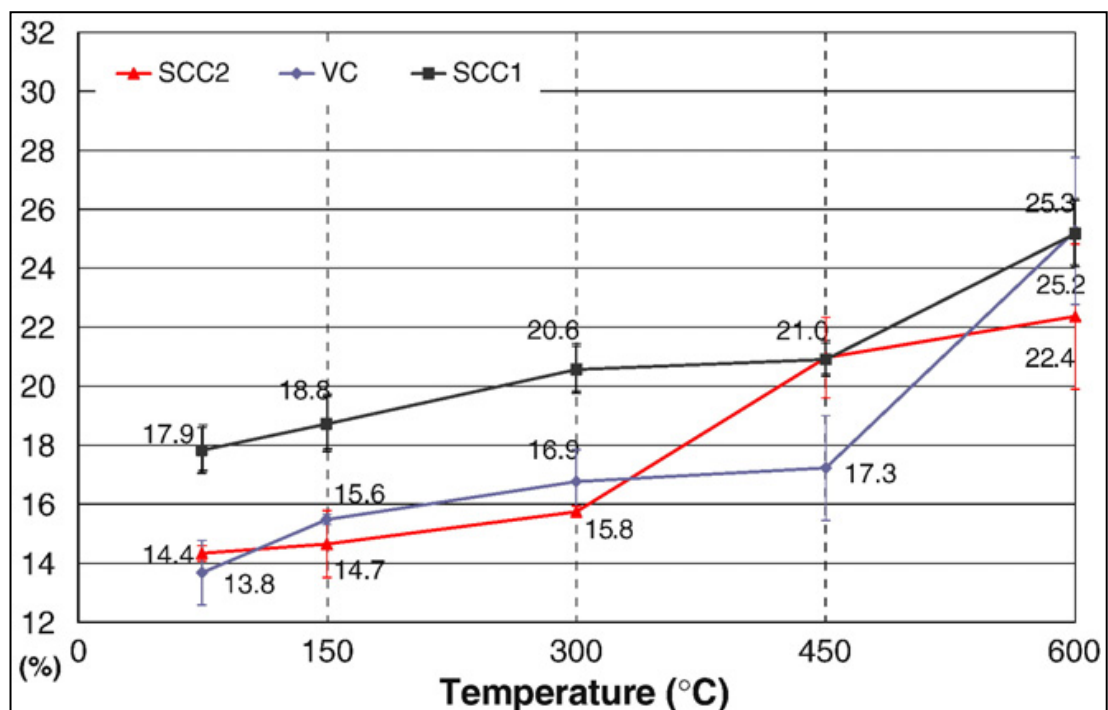


Figure 1.35 : Porosité en fonction de la température [67].

Fares et al. [67] ont attribué l'augmentation de la porosité avec la température à la génération de grands pores capillaires dus au dégagement de l'eau adsorbée des pores capillaires et au dégagement de l'eau liée en hydrates de pâte de ciment d'une part et à la décomposition des produits principaux d'hydratation (C-S-H et $\text{Ca}(\text{OH})_2$) d'autre part.

Les perméabilités sont identiques pour une température inférieure à 130 °C. Au delà de cette température, la perméabilité augmente avec le dosage en fibres. Plus particulièrement, cette augmentation concerne les BAP avec FPP à 200°C, car les fibres fondent à 171 °C. Plus la quantité de fibres est importante, plus la perméabilité augmente. Par contre, pour le BAP sans FPP, les différences ne sont pas significatives avant 300 °C. En normalisant la perméabilité à celle obtenue à 200 °C (Figure 1.36), la perméabilité est plus influencée par la disparition des fibres que par la microfissuration.

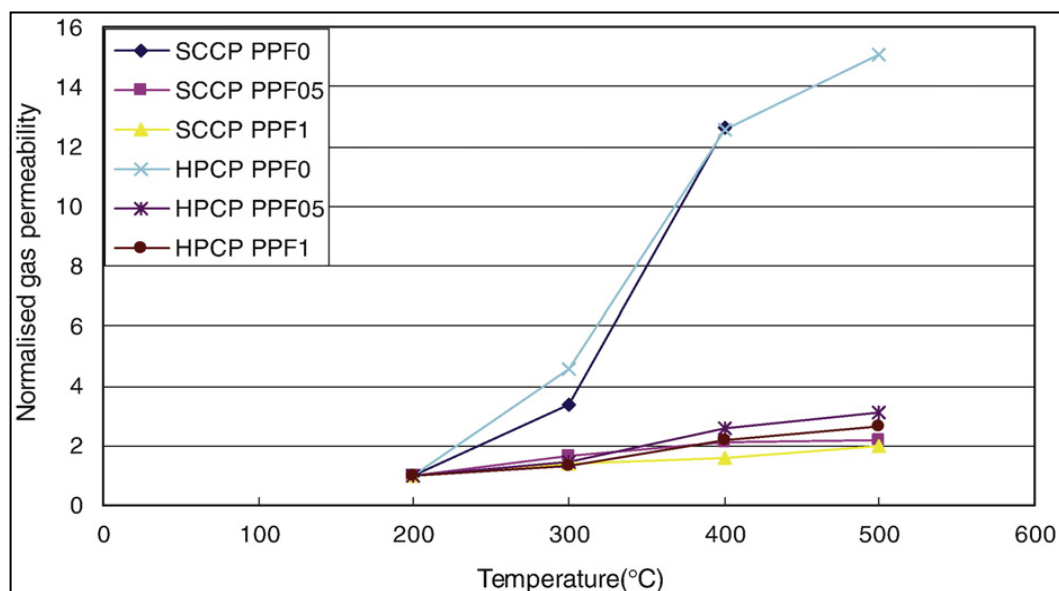


Figure 1.36 : Perméabilité normalisée par rapport à 200 °C [68].

La Figure 1.37 présente l'influence des fibres sur la perméabilité. La perméabilité normalisée augmente significativement à 200 °C. En effet, plus le dosage en fibres est important, plus l'augmentation est importante. On observe que l'influence des FPP est plus marquée pour les BAP que les BHP. Après 200 °C, la perméabilité normalisée tend à diminuer. A 400 °C, on attend le même niveau de perméabilité pour toutes les formulations testées. En effet, les fibres de polypropylène influencent la perméabilité entre 105 et 300°C. Au-delà de 300°C, l'état de dégradation devient le même pour tous les bétons.

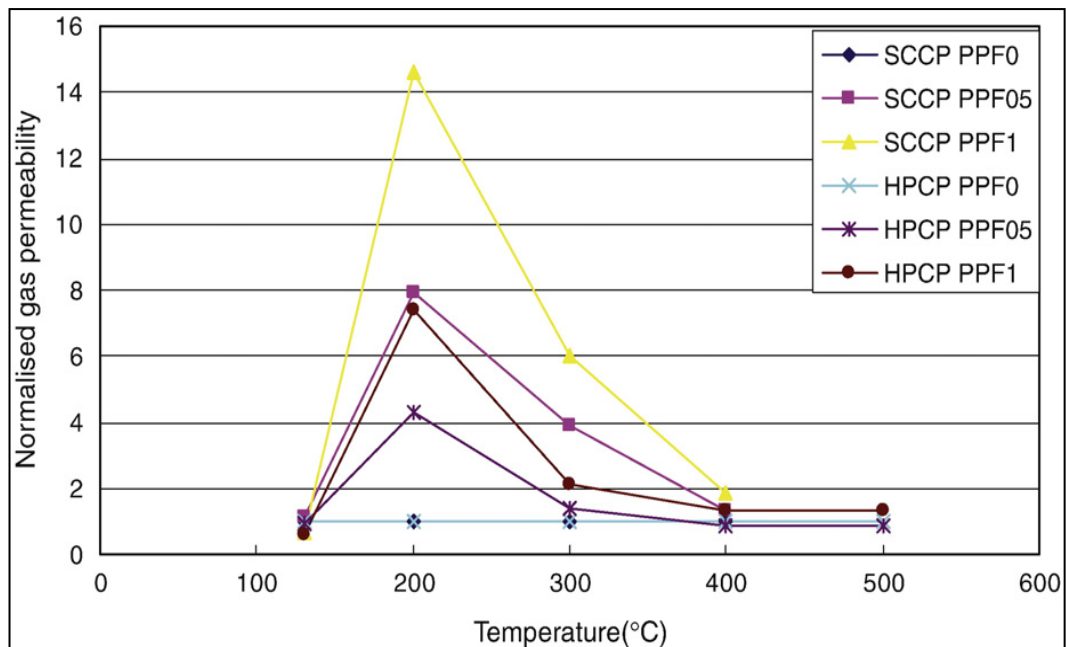


Figure 1.37 : Perméabilité normalisée par rapport aux bétons sans FPP [68].

Fares et al. [67] ont observé une augmentation régulière de la porosité des bétons examinés en raison du changement du réseau poreux (départ d'eau liée et de décomposition des hydrates) et de la microfissuration. La connectivité des pores et des microfissures a augmenté, ainsi que la perméabilité de tous les bétons (Figure 1.38).

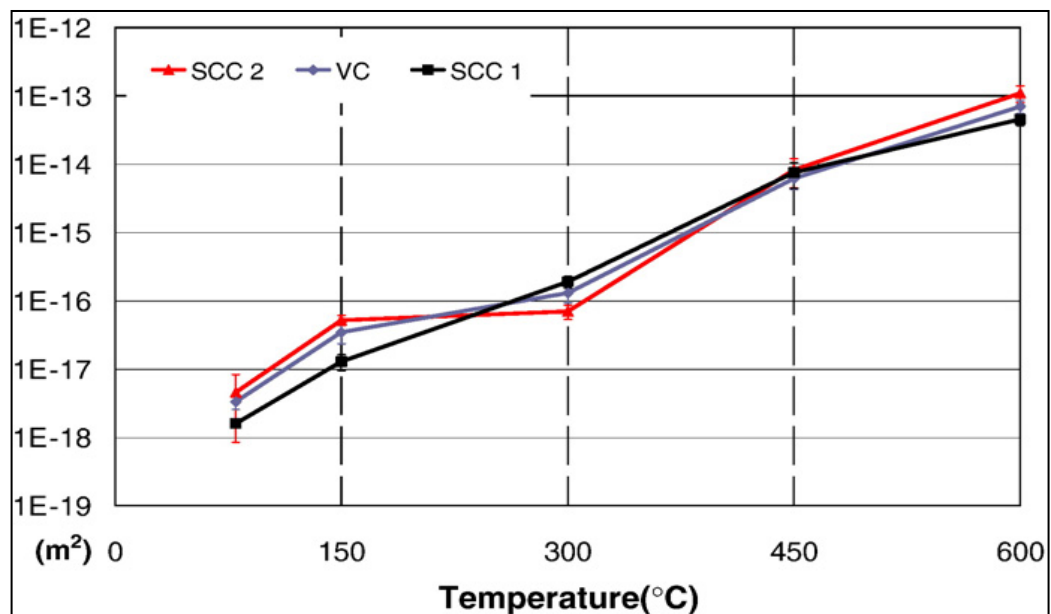


Figure 1.38 : Perméabilité intrinsèque en fonction de la température [67].

1.14 Conclusion

Le BAP est un béton très fluide, se mettant en place sans vibrations. Il doit présenter deux aspects, la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les milieux confinés sans vibrations et l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage. Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants (superplastifiant, agents de viscosité...) et des additions minérales (fumée de silice, fillers calcaires, laitier,...). Les BAP présentent une amélioration de la perméabilité au gaz, la diffusion des ions chlore, et l'absorption capillaire. Cependant, une diminution est constatée de la résistance à la carbonatation des BAP par rapport aux bétons vibrés.

Le comportement à l'état frais et à l'état durci de BAP est fortement influencé par le volume de pâte et la présence d'ajouts minéraux. Le but de ce travail de recherche, est justement de contribuer à la formulation et étudier les propriétés rhéologiques des BAP à base de matériaux locaux avec l'incorporation du laitier d'El Hadjar à différentes finesses.

CHAPITRE 2

MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse tout d'abord à la présentation des principales caractéristiques des matériaux utilisés dans la composition de BAP et ensuite des méthodes de formulation adoptées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre étude expérimentale.

2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

2.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portlant artificiel, du type CEM I 42.5 provenant de l'usine du Lafarge à Sig. Ce ciment présente une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le Tableau 2.1.

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

Composition chimique (%)									
CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	PAF	RI
63,40	21,06	3,60	4,47	1,85	2,00	0,13	0,57	2,53	0,65
Composition minéralogique (%)									
C₃S		C₂S			C₃A		C₄AF		
67,40		9,89			1,98		13,59		

Les essais physico-mécaniques du ciment ont été réalisés au laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida dont les résultats d'identification sont donnés dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Propriétés physique et mécanique de ciment utilisé

Essai	CEM I 42.5
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m ³)	1200
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m ³)	3050
Finesse SSB (cm ² /g)	2900
Temps de début de prise (heure, minute)	2h15
Temps de fin de prise (heure, minute)	5h25
Résistance à la compression (N/mm ²)	
2 jours	14,53
7 jours	31,10
28 jours	44,06

2.2.2 Le laitier

Dans notre étude nous avons utilisé le laitier granulé de haut fourneau du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, Wilaya d'Annaba comme addition. Le 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, (a) avant broyage, (b) après broyage.

Pour pouvoir l'utiliser comme addition dans les différentes compositions de BAP, nous avons d'abord procédé à son étuvage à 50 °C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage, nous l'avons ensuite complètement broyé dans un broyeur à boulets (Figure 2.2) d'une capacité de 5 kg (Laboratoire de la chimie industrielle à Blida) et 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, on a fixé trois finesses qui sont égales à 3500, 4200 et 5000 cm^2/g . Pour cela, nous avons broyé le laitier et on a mesuré sa finesse après chaque 15 minute de broyage. La Figure 2.3 présente la finesse du laitier en fonction du temps de broyage. Pour notre cas le laitier a été broyé pendant 125, 165, 234 minutes pour atteindre les finesses 3500, 4200 et 5000 cm^2/g respectivement.

La masse volumique apparente du laitier est de 956 kg/m^3 et sa masse volumique absolue est 2850 kg/m^3 .



Figure 2.2: Broyeur à boulet utilisé.

L'analyse chimique de laitier est montrée dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 : L'analyse chimique de laitier d'El Hadjar

Élément	Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	Mg O	MnO	K ₂ O	S O ₃	TiO ₂
(%)	40,10	6,00	2,00	42,20	4,70	2,60	1,20	0,15	1,20

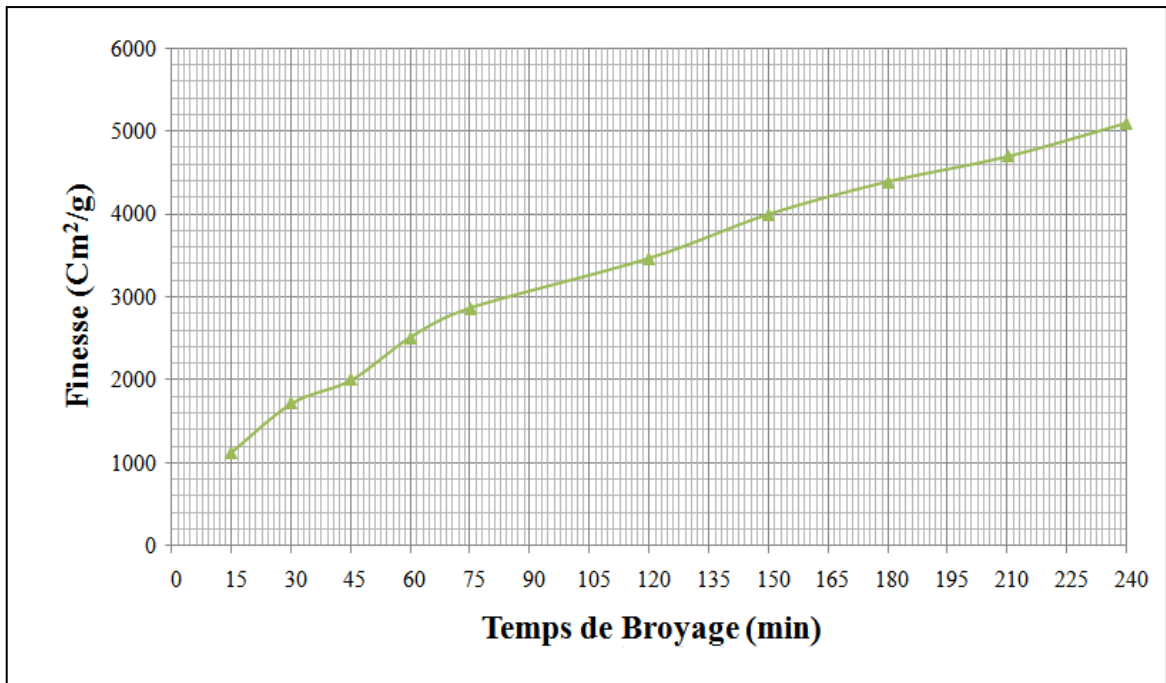


Figure 2.3 : Finesse du laitier en fonction du temps de broyage.

Le laitier granulé de haut fourneau utilisé dans notre étude expérimentale est un silicoaluminat de calcium et de magnésium, il est constitué essentiellement de quatre oxydes qui sont : ($SiO_2-Al_2O_3-CaO-MgO$).

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

$$M_{b1} = \frac{\% CaO + \% MgO}{\% SiO_2} = 1,17 \quad (2.1)$$

$$M_{b2} = \frac{\% CaO}{\% SiO_2} = 1,05 \quad (2.2)$$

$$M_{b3} = \frac{\% CaO + \% MgO}{\% SiO_2 + Al_2O_3} = 1,01 \quad (2.3)$$

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, est cette dernière 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 2.4 : Indice d'Activité hydraulique du laitier granulé [69]

Classe	L'indice hydraulique α	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 α moyen de 44 (laitier acceptable).

2.2.3 Les Granulats

2.2.3.1 Le sable

Le sable utilisé dans cette étude provient de la région de Baghlia (wilaya de Tizi-Ouzou). Le sable de Baghlia est un sable roulé de formes arrondies et de surface lisses. Il est caractérisé par sa granulométrie et son diamètre maximal (grosseur maximale) qui n'excède pas 5 mm, de masse volumique apparente ($\rho_{app} = 1600 \text{ kg/m}^3$), de masse volumique absolue ($\rho_{abs} = 2560 \text{ kg/m}^3$), de coefficient d'absorption de 1,1 %, de humidité relatif de 1,67% et de module de finesse de 3,35. Les résultats de degré de propreté du sable qui sont obtenu par le biais de l'essai d'équivalent de sable (E.S) visuel et au piston sont 82.34% et 78.34% respectivement. La Figure 2.4 présente la courbe granulométrique de sable testé après le séchage et tamisage par une tamiseuse électrique.

2.2.3.2 Le gravier

Le gravier utilisé est de deux classes granulaires différentes, le premier est un gravier de classe 3/8 et le deuxième de classe 8/15. Ces deux types de graviers provenant de la même station de concassage de Setif. Les principales caractéristiques physiques de gravier sont données dans le Tableau 2.5. La Figure 2.4 présente les courbes granulométriques des graviers utilisés.

Tableau 2.5 : Caractéristiques physique de gravier utilisé

Granulats	Classe granulaire (mm)	ρ_{app} (kg/m ³)*	ρ_{abs} (kg/m ³)**	Humidité (%)	Coefficient d'absorption (%)
Gravier	3/8	1475	2730	0,13	0,5
	8/15	1465	2700	0,30	0,5

(*) Masse volumique apparente,

(**) Masse volumique absolue.

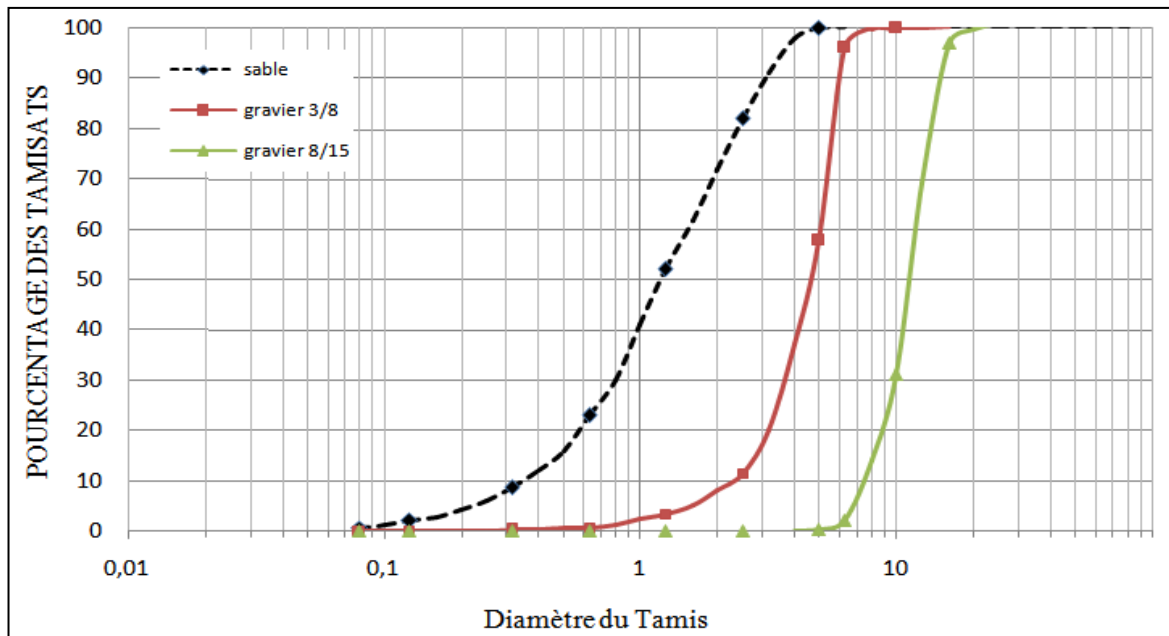


Figure 2.4 : Courbes Granulométriques du sable et des graviers.

2.2.4 L'eau de gâchage

Pour la confection des mortiers et bétons, nous avons utilisé de l'eau potable du robinet exempté d'impuretés.

2.2.5 Le Superplastifiant

Un seul type d'adjuvant a été employé durant notre étude, un superplastifiant de haut réducteur d'eau de la troisième génération. Ce superplastifiant est produit de Granitex-NP et commercialisé sous le nom de 'MEDAFLOW 30'. Il est à base de polycarboxylates qui fonctionnent par répulsion stérique, de densité 1.07 ± 0.01 , le pH varie entre 6 à 6,5, la teneur en ions chlorures inférieure ou égale à 1 g/l, et il possède 30% d'extraits sec. La plage d'utilisation recommandée varie de 0,5 à 2,0 % du poids du ciment soit 0,5 à 1,850 litre pour 100 kg de ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Il se caractérise par sa grande durée de rhéologie et de sa résistance à la ségrégation. Ces caractéristiques nous ont permis de réaliser tous les essais préconisés pour les BAP à l'état frais sans utiliser de retardateur de prise ou d'agent de viscosité.

2.3 Formulations adoptées

La formulation du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment, en eau et en adjuvant, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées.

La plupart des formulations de BAP sont conçues actuellement de manière empirique, et on doit concilier deux caractéristiques à priori contradictoires la fluidité et la stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage). Par conséquent, les BAP doivent satisfaire plusieurs tests, qui permettent de caractériser les principales propriétés du BAP à l'état frais : la mobilité en milieu confiné, la mobilité en milieu non confiné, et la stabilité et ce contrairement aux méthodes classiques de formulation, qui ne considèrent généralement que l'affaissement et la résistance à la compression à 28 jours (comme critères de caractérisation).

Boukandakji [34] précise que la formulation du BAP requiert une étude précise notamment dans le choix de ses constituants, et l'optimisation des paramètres influant en particulier les rapports eau/liant (E/L), le rapport sable/mortier (S/M), et la variation du rapport superplastifiant/Liant (Sp/L).

Pour mettre en évidence l'effet du laitier, comme ajout minéral sur le comportement rhéologique et mécanique du BAP, nous avons fixé tous les autres paramètres, le rapport Sable/Mortier, le rapport Eau/Liant ainsi que le pourcentage en superplastifiant par rapport au liant. Nous avons confectionné nos mélanges selon la formulation proposée par le

japonais Okamura avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport eau/liant ainsi que le rapport superplastifiant/liant. Ces derniers ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs de l'étalement au cône d'Abrams et du temps d'écoulement au V-Funnel acceptables. Pour la sélection des quantités d'air et de graviers, la méthode Okamura a été maintenue.

2.3.1 Formulation du Mortier

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BAP lui-même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer le non ségrégation du béton durant l'écoulement.

Des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominants.
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode que tester un béton.

Afin d'obtenir une composition de base sur les bétons autoplacants à base de laitier, nous avons suivi les mêmes principes de formulations utilisés par Boukendakdji [34]. En se basant sur les résultats trouvés dans ces travaux concernant l'optimisation du rapport sable/mortier, nous avons fixé : le rapport Sable/Mortier à 0,50, le rapport E/C à 0,40 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/poudre (Sp/P). Pour chaque dosage de superplastifiant, des mesures d'étalement et du temps d'écoulement ont été effectués sur leurs mortiers correspondants.

La sélection du rapport Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette de mortier de référence (mortier ne comportera pas de laitier) obtenu doit être compris entre $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$ [70].

2.3.1.1 Confection des mortiers

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées selon une méthode donnée en annexe A.

Plusieurs auteurs décrivent la méthode de malaxage dans le but de couvrir la surface de tous les agrégats par la pâte de ciment et d'assurer le mélange le plus homogène possible des différents constituants. Dans nos essais nous avons opté pour la proposition de Domone et Jin [71] qui s'articule sur les étapes suivantes (Figure 2.5) :

- ◆ 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 capacité de 5 litres) (Figure 2.6).
- ◆ Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d'eau ($E_{1} = 70\% E_{2}$),
- ◆ Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l'eau de gâchage ($E_{2} = 30\% E_{1}$) mélangé avec le superplastifiant,
- ◆ Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

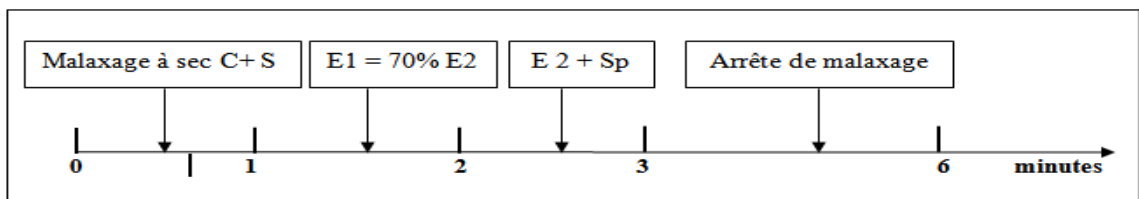


Figure 2.5 : Séquence de malaxage du mortier [71].



Figure 2.6 : Malaxeur à mortier.

2.3.2 Formulation du BAP de Référence

Les essais effectués sur mortier est une étape indispensable car elle permet de fixer les rapports E/L (eau/liant), S/M (sable/mortier) ainsi que Sp/L (superplastifiant/liant) qui facilité par la suite la formulation du BAP de Référence (0% Laitier).

Par la même procédure d'exécution de la méthode générale, on formule le BAP de référence en se basant sur les résultats d'optimisation de mortier. Si nécessaire le rapport Sp/L sera ajusté afin d'obtenir un bon étalement sans ségrégation ni ressuage.

Les différentes proportions ont été calculées selon la procédure donnée en annexe B.

2.3.2.1 Confection des BAP

Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 40 litres (Figure 2.7).



Figure 2.7 : Malaxeur pour béton.

Pour notre cas, la séquence suivie est celle décrite dans la Figure II.8 ; elle suit les étapes suivantes :

- ◆ Calculer l'eau efficace que l'on introduit dans le malaxeur en prenant en compte la teneur en eau et l'absorption des granulats ainsi que l'eau contenue dans l'adjuvant. La quantité d'eau efficace est donnée par la formule suivante

$$E_{\text{eff}} = E_{\text{totale}} - E_{\text{teneur en eau}} - E_{\text{adjuvant}} + E_{\text{absorbée par granulats}} \quad (\text{annexe B})$$
- ◆ Calculer les proportions du ciment, sable, gravier 3/8, gravier 8/15 et superplastifiant (voir annexe B).
- ◆ Malaxer le sable, ciment, laitier et gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange.
- ◆ Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau ($E_{\text{au1}} = 70\% E_{\text{eau}}$) ;
- ◆ Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage ($E_{\text{au2}} = 30\% E_{\text{eau}}$) ;
- ◆ Malaxer pendant 5 minutes ;
- ◆ Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- ◆ Remalaxer pendant 30 secondes.

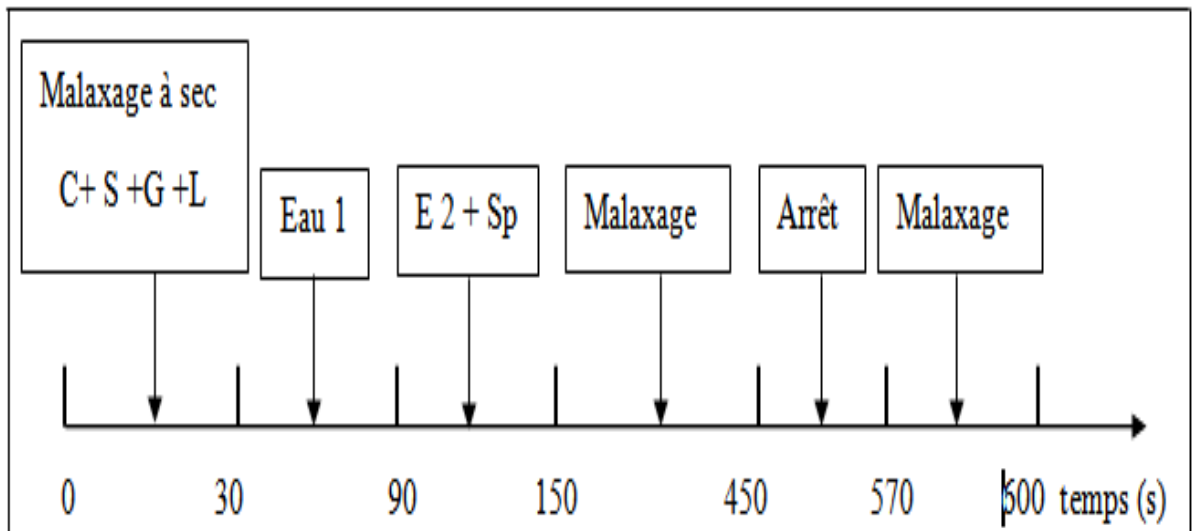


Figure 2.8 : Séquence de malaxage du béton autoplaçant [71].

Cette séquence de malaxage est la même pour tous les mélange de bétons. En ce qui concerne le re-malaxage il se fait juste avant chaque essai.

2.3.3 Substitution du ciment par du laitier

Après avoir obtenu le BAP de référence, on procèdera à la substitution du ciment par du laitier à différents pourcentages. Des études ultérieures [7, 34, 69, 71] ont montré le dosage optimal du laitier de haut fourneau Algérien est limité entre 15 et 30% en substitution de ciment. Pour les raisons citées ci-dessus, nous avons décidé de limiter les pourcentages de laitier utilisés dans notre étude à 10, 15, 20 et 25%.

2.4 Essais de caractérisations technologiques des BAP

Il n'existe pas d'essai standard, bien définie pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. En effet, le comportement spécifique des BAP à l'état frais rend quasi inadaptes la plupart des essais classiques sur les bétons traditionnels. Les essais au maniabilimètre ne sont pas possibles en l'absence de vibration et l'essai classique d'affaissement au cône d'Abrams est inopérant. C'est pourquoi les chercheurs et les industriels ont développé toute une série d'essais plus ou moins complémentaires, mais dont l'interprétation reste bien souvent subjective et dépendante de l'opérateur.

2.4.1 Essais relatifs au Mortier à l'état frais

2.4.1.1 Essai d'Étalement au Mini-Cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenue. La tendance à la ségrégation et au ressuage peut être détectée visuellement, le sable doit être réparti uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. La Figure 2.9 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

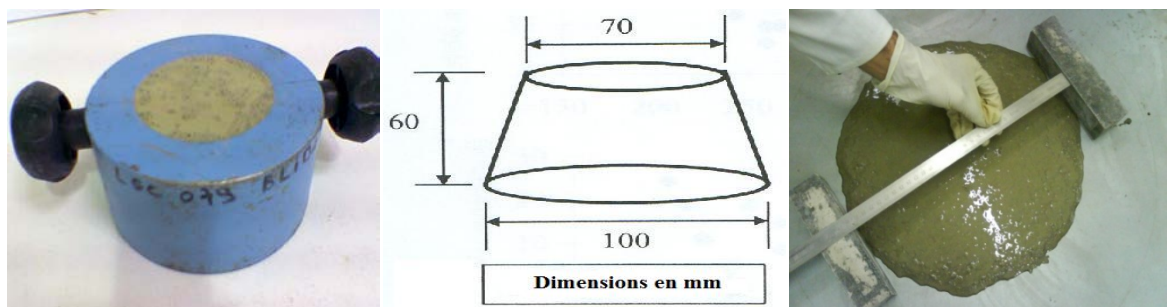


Figure 2.9 : Essai d'Étalement pour Mortier.

2.4.1.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et le 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 2.10). Au cours de l'essai le mortier doit s'écouler avec une vitesse constante; un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le mortier.

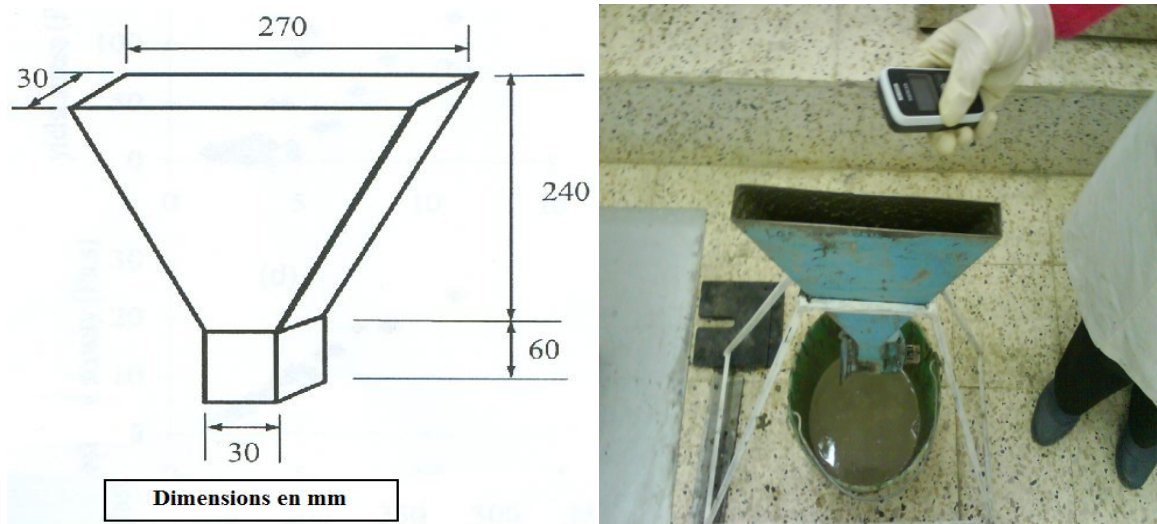


Figure 2.10 : Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier.

Des essais réalisés avec des matériaux Japonais ont montré que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10 sec produisent un bon BAP [34]. Des essais sur des matériaux Anglais, ont suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 sec [34].

2.4.2 Essais relatifs au BAP à l'état frais

Pour accorder les deux caractéristiques contradictoires de BAP c'est-à-dire la fluidité et la ségrégation, nous avons procédé à un certain nombre d'essais qui sont recommandés par (AFGC) [18] qui permettent de caractériser les principales propriétés du BAP à l'état frais. Les recommandations nationales (AFGC) prévoient de caractériser les BAP à l'état frais en prenant en compte les trois caractéristiques principales demandées :

- la mobilité en milieu non confiné, décrit par l'essai d'étalement et le V-Funnel;
- la mobilité en milieu confiné, décrit par la boîte en L et en U ;
- la stabilité c'est-à-dire la résistance à la ségrégation et au ressuage.

2.4.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Flow test)

L'essai d'étalement est réalisé à l'aide du cône d'Abrams (Figure 2.11). Ce dernier est un moule en métal non directement attaquable par la pâte de ciment, d'une épaisseur minimum de 1,5 mm. La paroi intérieure du moule lisse et de forme d'un tronc de cône creux, dont le diamètre de base inférieur est de 200 ± 2 mm et le diamètre de base supérieur est de 100 ± 2 mm. Il a une hauteur de 300 ± 2 mm.

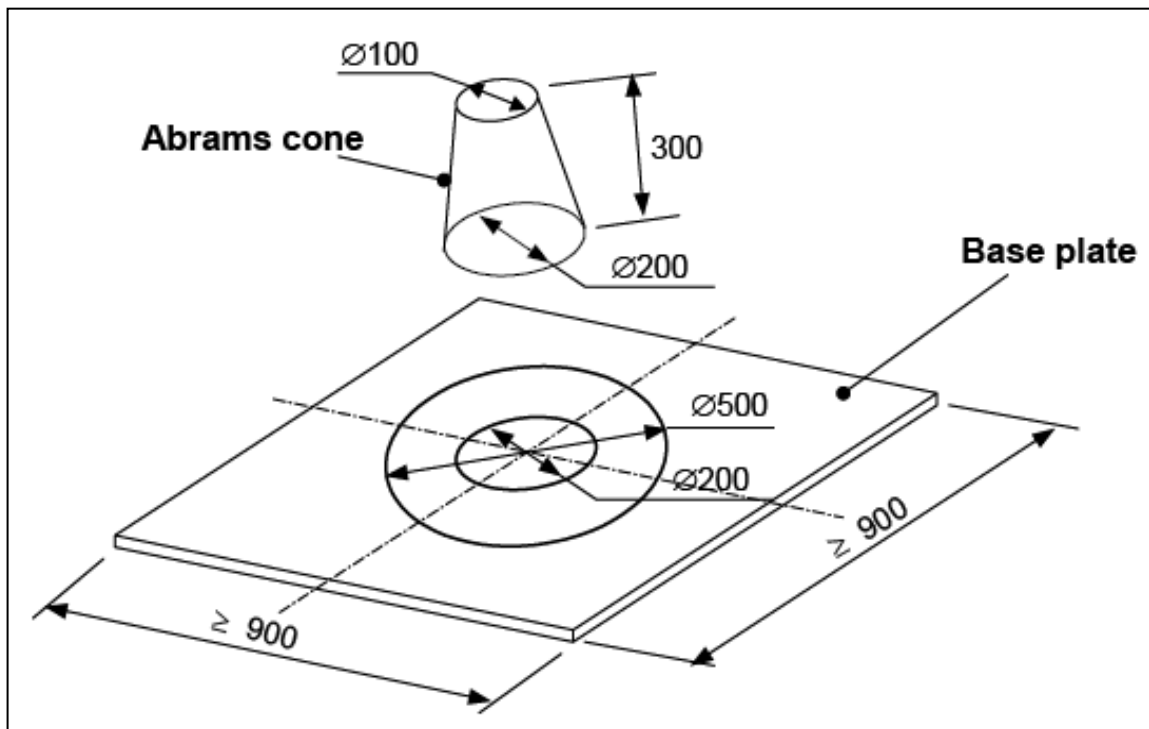


Figure 2.11 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow) [72].

On remplit le cône de l'échantillon de béton à tester, puis on soulève le cône lentement pour permettre au béton de s'étaler. Cette opération de soulèvement du cône doit durer 5 secondes environ. On mesure ensuite la taille de la galette de béton obtenue (Figure 2.12). Sa dimension correspond à la moyenne de deux diamètres mesurés. A cause de la nature visqueuse du BAP, les lectures des mesures d'étalement doivent se faire après stabilité de la galette, soit environ 60 secondes après soulèvement du cône [73].



Figure 2.12 : Mesure du diamètre d'étalement.

D'après AFGC [18], 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). Selon EFNARC [6], la mesure de l'étalement au cône d'Abrams, peut être divisée en trois (03) classes. Le Tableau 2.6 définit ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP :

Tableau 2.6 : Classification des BAP selon domaine d'utilisation [6]

Classe	Etalement (en mm)	Domaine d'utilisation de BAP
SF1	550 - 650	<ul style="list-style-type: none"> • structures nom ou peu ferrillées. béton coulé à partir du haut (ex. les dalles). • coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels). • petites sections (ex. les piles et les fondations profondes).
SF2	660 - 750	<ul style="list-style-type: none"> • La majorité des applications.
SF3	760 - 850	<ul style="list-style-type: none"> • applications verticales. • structures trop ferrillées. • coulage à partir du dessous du coffrage. • structures de forme complexe.

La classe SF3 est typiquement produite avec les petites dimensions maximales de granulats ($D_{max} < 16$ mm), et donne généralement une meilleure finition de surface que la classe SF2, mais la résistance à la ségrégation est difficile à contrôler.

Lors de l'essai d'étalement, on mesure le T_{50} temps d'écoulement, c'est le temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau et peut donner aussi des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange. Pour des BAP cette valeur est, généralement, comprise entre 2 et 5 secondes [74].

2.4.2.2 Essai à l'Entonnoir en V (V-Funnel test)

D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné comme celui de l'entonnoir en forme de V (V tunnel) (Figure 2.13) développé par Okamura et Ozawa en 1995 [20].

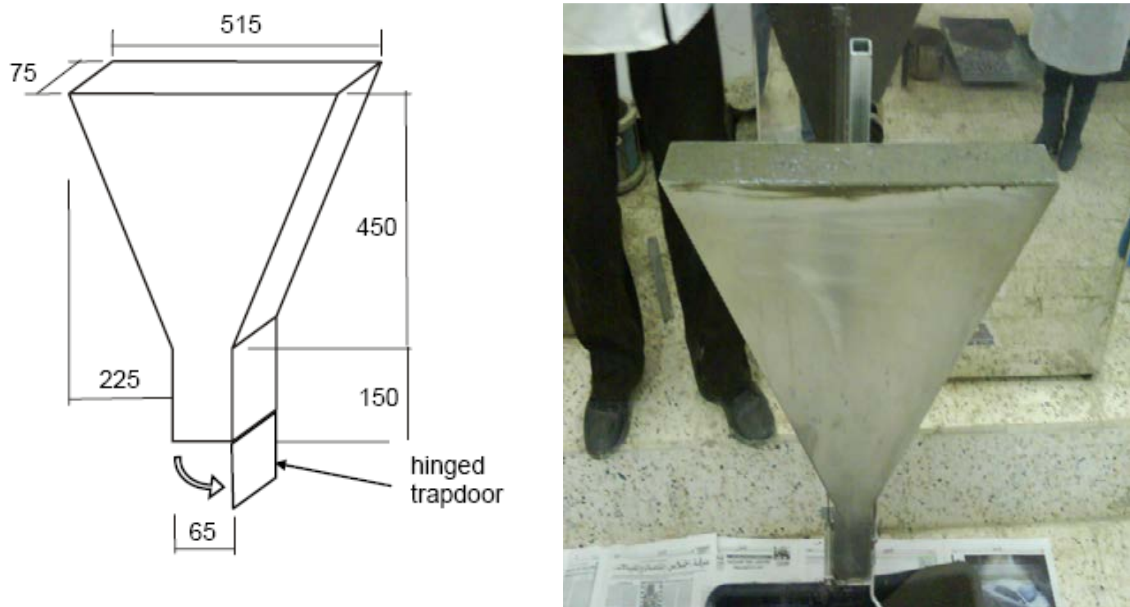


Figure 2.13 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).

On remplit l'entonnoir de béton de capacité de 12 litres, puis on laisse reposer pendant 1 minute. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice.

L'essai de l'entonnoir en V nous enseigne sur la stabilité, ainsi que sur la viscosité du mélange étudié. S'il y a de la ségrégation, on observera un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir, ou si le mélange est trop visqueux, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important.

Selon EFNARC [6] le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être compris entre 6 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante. Et à partir de ce dernier ces spécifications EFNARC [6] ont définies deux classes de viscosité qui sont :

- VF1 si le temps d'écoulement t est inférieur à 8 s. Cette classe correspond à $T_{500} \leq 2s$.
- VF2 pour un temps d'écoulement compris entre 9 et 25 s. Cette classe correspond à $T_{500} > 2s$.

2.4.2.3 Essai à la couronne J (J-Ring test)

Pour caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique, aucun essai de référence n'a encore fait l'unanimité, mais tous ont pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement [45].

L'essai à la couronne J (J-ring test) permet d'évaluer la mobilité du béton en milieu confiné. Cet essai consiste à investiguer les deux propriétés, la capacité au remplissage et la capacité de passage du BAP. Il peut aussi être utilisé pour étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. On l'appelle aussi l'essai d'étalement modifié (J-Ring). Il fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature de 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre (Figure 2.14). Le BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau [72].

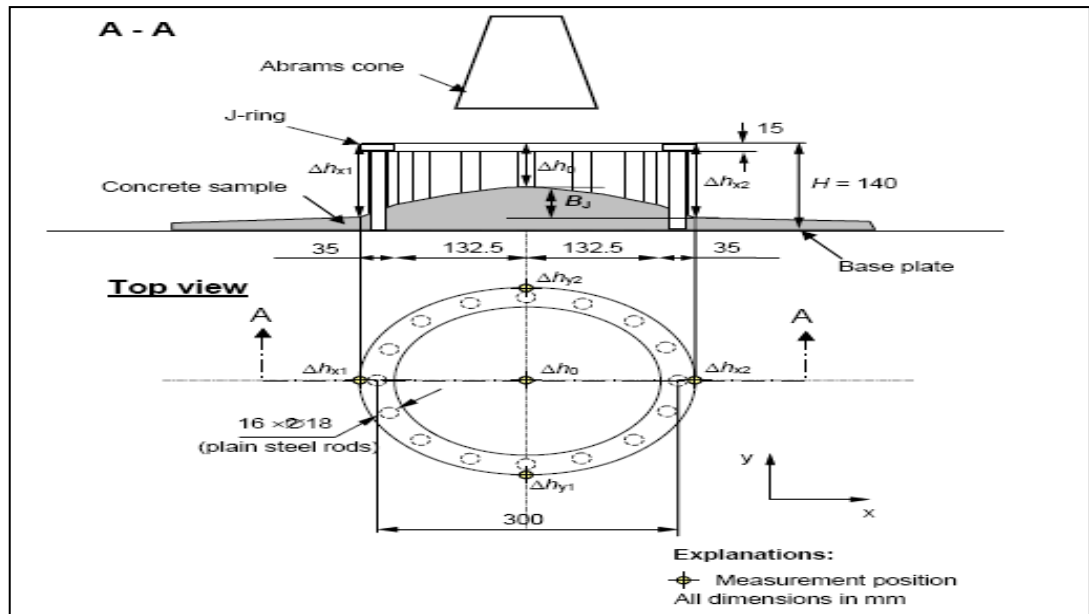


Figure 2.14 : Dimension du J-ring et position pour mesure de différence d'hauteurs.

L'essai J-ring permet de mesurer trois paramètres :

- ✓ l'étalement S_J par la mesure du plus grand diamètre de la galette du BAP d_{\max} , puis le diamètre perpendiculaire au premier d_{perp} , puis on calculera l'étalement à partir de la formule suivante :

$$S_J = \frac{(d_{\max} + d_{\text{perp}})}{2} \quad (\text{II.5})$$



Figure 2.15: Mesure d'étalement en présence du J-Ring.

- ✓ le temps d'écoulement T_{50J} qui est la période entre le moment où le cône est soulevé et le moment où le BAP touche le cercle de diamètre 500 mm.
- ✓ la différence d'hauteurs B_J du BAP entre l'intérieur et l'extérieur du J-ring pour pouvoir confirmer ou infirmer le blocage. Les hauteurs sont montrées sur la Figure 2.16. Pour un bon BAP sans risque de blocage, la différence d'hauteurs B_J ne doit pas dépasser 10 mm. B_J est calculée avec la formule suivante [34] :

$$B_J = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0 \quad (2.6)$$



Figure 2.16 : Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring.

2.4.2.4 Essai à la boîte en L (L-Box test)

D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu confiné comme l'essai de la boîte en L (Figure 2.17). Ce test permet de caractériser la viscosité du mélange, de plus la présence de barres simulant des armatures d'un coffrage renseigne sur la capacité de remplissage du mélange. On place le béton dans la partie verticale de la boîte environ 13 litres. Après arasement, on laisse le béton se reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage.

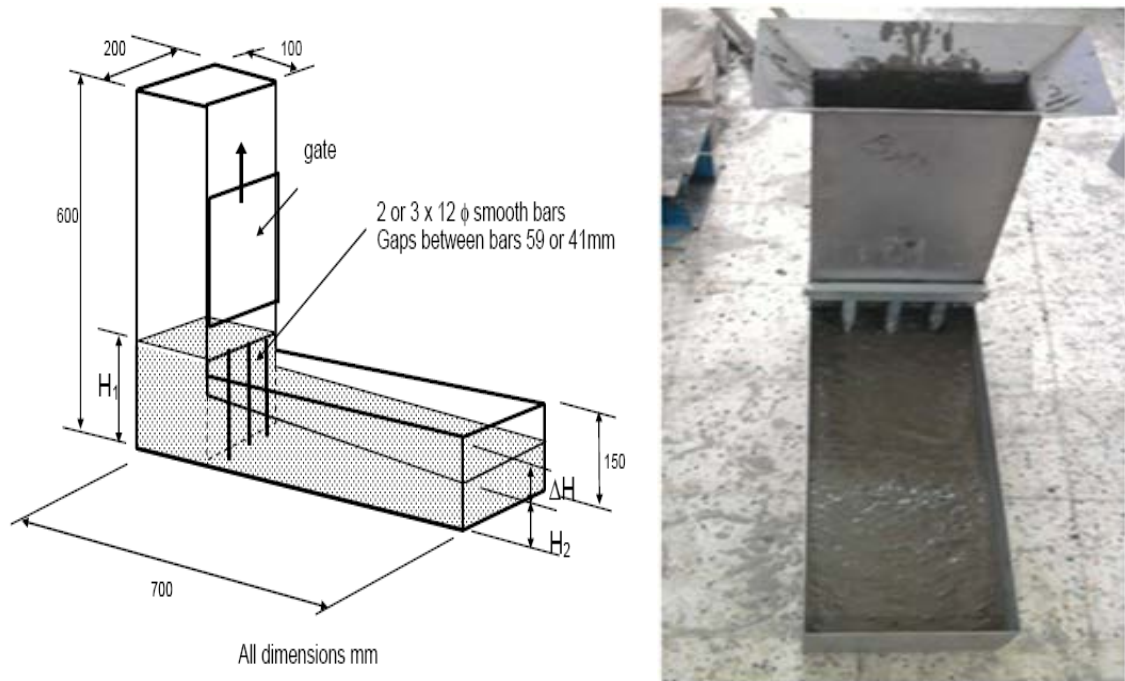


Figure 2.17 : Essai de la boîte en L [6].

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 H_1 et H_2 et on exprime en terme de taux de remplissage H_2 / H_1 qui renseigne sur la capacité du BAP à cheminer en milieu confiné.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation. Si, par contre, on observe une bonne distribution des gros granulats tout au long de la partie horizontale du L, on pourra dire que ce béton est homogène.

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H_2/H_1) doit être supérieur à 0,8 [18]. Les temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton. Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour T_{20} et inférieures à 3.5 secondes pour T_{40} afin de rester dans un domaine autoplaçant [72].

2.4.2.5 Essai à la boîte en U (U-Box test)

L'essai de la boîte en U décrit aussi la mobilité du BAP en milieu confiné ainsi que sa résistance à la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des BAP. Le principe est identique à l'essai de l'écoulement à la boîte en L. L'essai permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton. Le dispositif d'essai (Figure 2.18) est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante.

Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, et les spécifications des différents pays). Le béton est versé dans la partie R1 de façon continue, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint). La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Si le béton coule aussi librement que l'eau, au repos on aura une surface horizontale ($h_2 - h_1 = 0$). Un béton peut être considéré comme autoplaçant si cette différence d'hauteur se rapproche le plus de cette valeur nulle [66].

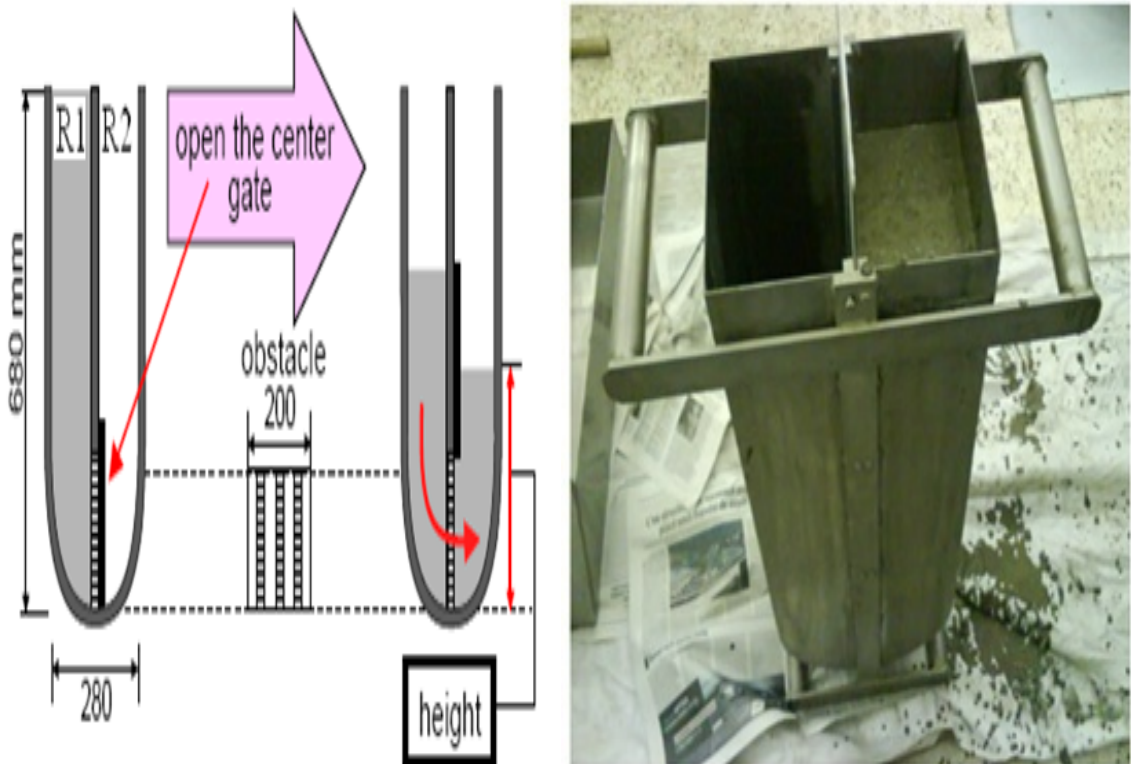


Figure 2.18: Essai à la boîte en U [2].

2.4.2.6 Essai de résistance à la ségrégation par tamisage

Cet essai permet de caractériser l'amplitude du BAP à rester homogène après sa mise en place et jusqu'au début de prise (Figure 2.19). Le BAP doit demeurer stable sous l'effet de la gravité et ne doit pas présenter des signes de ressuage. L'essai de stabilité au tamis est proposé dans les recommandations provisoires de l'Association Française de Génie Civil [18]. Il consiste à prélever une quantité de béton frais ($4.8 \pm 0.2 \text{ kg}$) d'un échantillon de 10 litres mis au repos pendant 15 minutes, de la déverser sur un tamis de maille 5 mm avec une hauteur de chute de 50 cm et après 2 minutes d'attente, le pourcentage de laitance qui traverse le tamis est calculé selon l'expression suivant :

$$\Pi = \frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{échantillon}}} \times 100 \quad (2.7)$$



Figure 2.19 : Essai de résistance à la ségrégation au tamis.

Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- ♦ $0 \leq \Pi \leq 15\%$: la stabilité est satisfaisante,
- ♦ $15 \leq \Pi \leq 30\%$: la stabilité est critique,
- ♦ $\Pi > 30\%$: la stabilité est très mauvaise.

2.5 Récapitulatif du programme des essais réalisés

Dans cette section, nous résumons le programme expérimental réalisé et les variables étudiés. Ce travail a été fait par plusieurs étapes, la première concerne la formulation des mortiers ainsi que l'étude de l'effet du dosage du superplastifiant sur leurs ouvrabilité en fixant le rapport sable/mortier $S/M = 0,50$, le rapport $E/C = 0,40$ et en procédant aux essais d'étalement et d'entonnoir en V puis, de la même procédure d'exécution, on a formulé le BAP de référence à base les résultats des essais sur mortier, afin d'aboutir aux résultats adéquats pour un bon étalement sans ségrégation ni ressuage. Et pour cette raison nous avons joué sur le rapport Sp/L et à la fin des essais ont été réalisés sur le BAP à l'état frais (essais d'étalement au cône, d'écoulement à l'entonnoir en V, d'écoulement à la boîte en U, essai à la boîte en L, essai à la Couronne J et de stabilité au tamis) pour montre l'influence de finesse du laitier sur les caractéristiques rhéologiques du béton frais. La Figure 2.20 récapitule les essais réalisés sur le mortier et le béton à l'état frais.

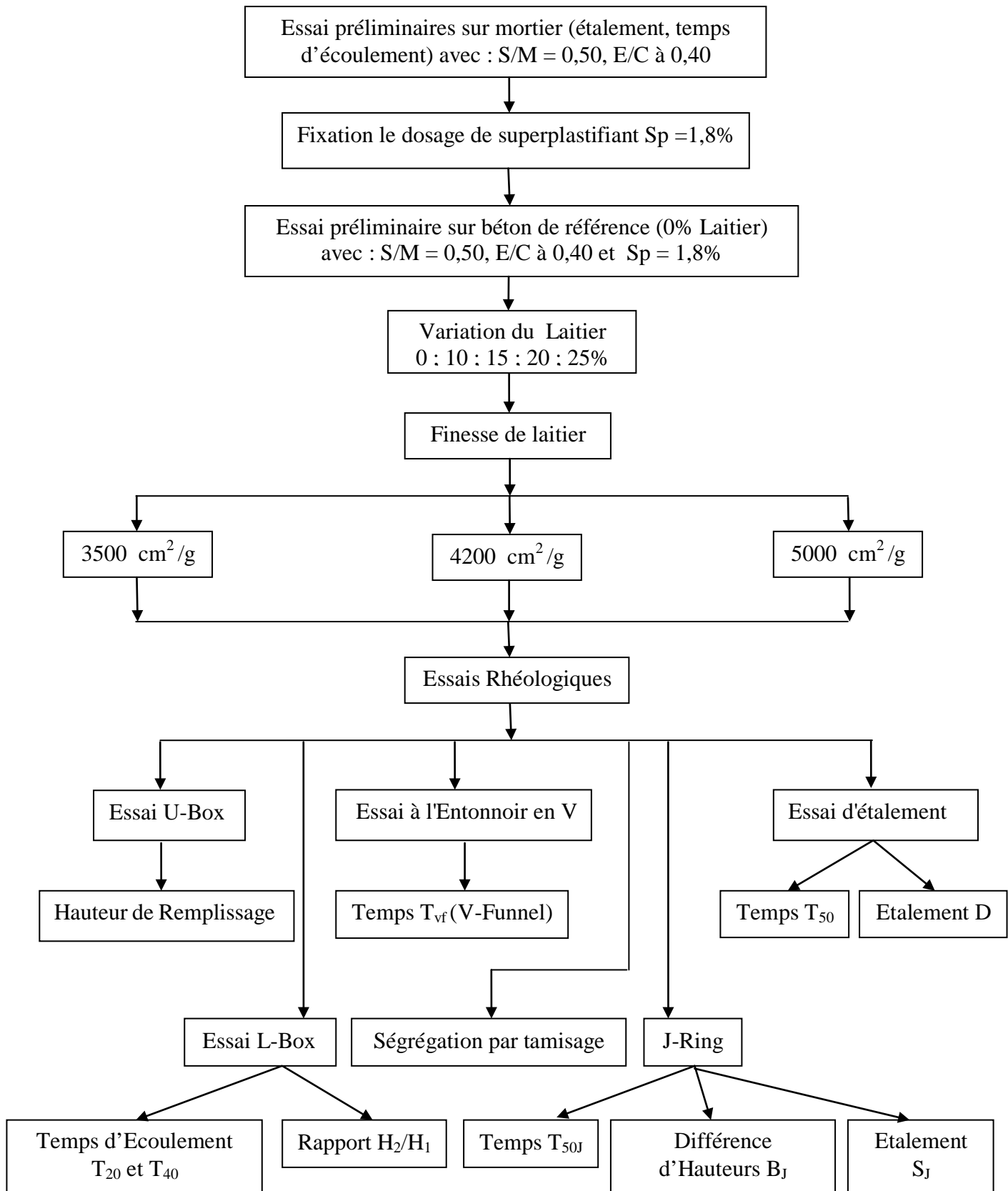


Figure 2.20 : Diagramme des essais réalisés sur le mortier et le béton à l'état frais.

CHAPITRE 3

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des résultats obtenus expérimentalement tout d'abord sur mortier autoplaçant (MAP) afin d'optimiser le dosage de superplastifiant puis dans la composition du béton autoplaçant de référence. Après avoir fixé tous les paramètres de formulation on étudiera par la suite l'effet de la quantité du laitier (effet chimique) et la sa finesse (effet physique) sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais.

3.2 Optimisation du rapport Superplastifiant/Liant (S/L)

L'utilisation des superplastifiants permet de réduire la teneur en eau et par conséquent, améliorer la déformabilité, la stabilité et les propriétés mécaniques des BAP. Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquies des charges identiques et de créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ceci permet de libérer une partie de l'eau piégée par les grains de ciment floculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton.

L'optimisation du rapport superplastifiant/Liant consiste à déterminer le dosage optimal de superplastifiant capable de donner un maximum d'ouvrabilité au mortier sans ségrégation et ressuage. La détermination de dosage optimal conduit à faciliter la formulation de béton et assurer aussi une meilleure performance du BAP à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à réaliser quelques essais relatifs au mortier afin d'optimiser le rapport superplastifiant/liant et par conséquent fixer ce rapport au niveau des essais sur béton. Cette optimisation se fait en se basant sur les résultats trouvés dans les travaux de Boukendakdji [34] ; nous avons fixé : le rapport Sable/Mortier à 0,50, le rapport E/C à 0,40 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/poudre (Sp/P). Pour chaque dosage de

superplastifiant, des mesures d'étalement et du temps d'écoulement ont été effectués sur leurs mortiers correspondants.

La sélection du rapport Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette de mortier de référence (mortier ne comportera pas de laitier) obtenu doit être compris entre $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$ [70].

3.2.1 Effet du dosage de superplastifiant sur l'ouvrabilité du mortier autoplaçant

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en superplastifiant sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement (cône d'Abrams) et du temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V (V-Funnel), en fonction du dosage en superplastifiant (Sp/P) variant de 1,2% à 2,2%.

Les différentes compositions des mortiers obtenues, en fonction du rapport (Sp/P) sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition des mortiers pour différentes valeurs de (Sp/P)

Compositions	Unité	MOR 1	MOR 2	MOR 3	MOR 4	MOR 5	MOR 6
Ciment	kg/m ³	686,9	686,9	686,9	686,9	686,9	686,9
Sable	kg/m ³	1287,6	1287,6	1287,6	1287,6	1287,6	1287,6
Eau	kg/m ³	261,3	260,4	259,4	258,5	257,5	256,5
Superplastifiant	%	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
Superplastifiant	kg/m ³	8,24	9,61	10,99	12,36	13,73	15,11

a- Etalement au mini-cône pour les mortiers

Les résultats d'étalement au mini-cône pour les mortiers en fonction du dosage en superplastifiant sont donnés dans le Tableau 3.2 et illustrés sur la Figure 3.1.

A partir de la Figure, nous pouvons remarquer que l'augmentation de dosage en superplastifiant conduit à un accroissement de l'étalement qui varie entre 292 mm à

315 mm. Cette variation de l'étalement est située dans l'intervalle de mortier autoplaçant proposé par Domone et Jin [70]. Cependant, les observations visuelles pour le dosage de 2,2% détectent une présence d'une laitance en périphérie de la galette de mortier et accumulation de sable au centre de la galette de mélange (Figure 3.2 et 3.3).

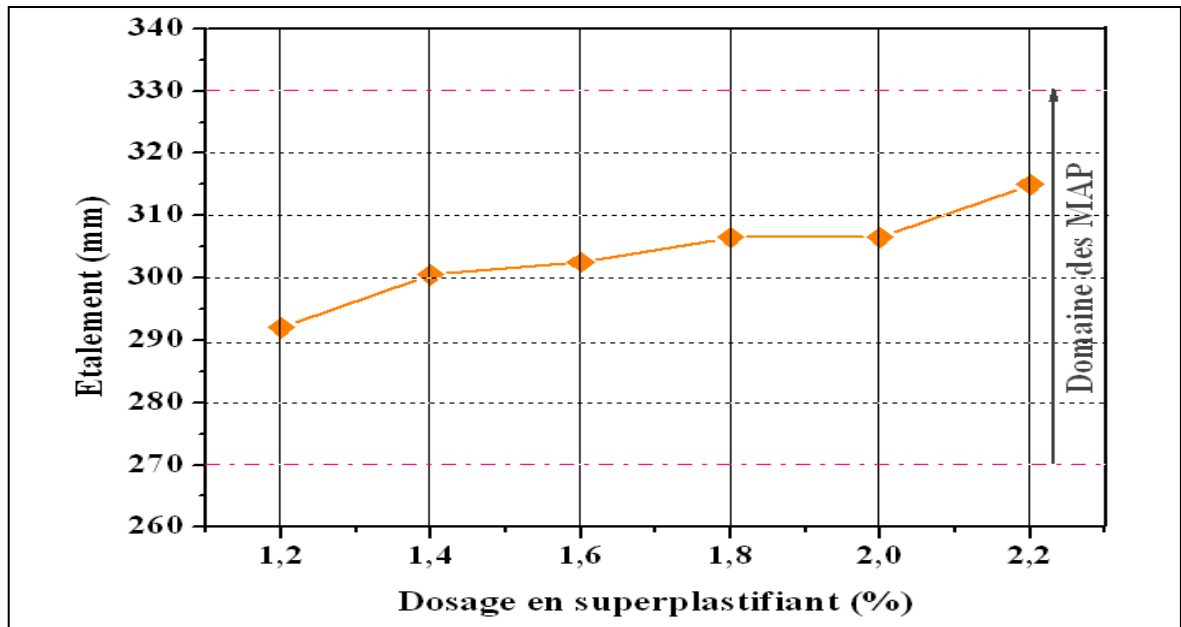


Figure 3.1 : Etalement en fonction du dosage en superplastifiant.



Figure 3.2 : L'étalement du mortier (Sp/P = 2,2%).



Figure 3.3 : L'étalement du mortier (Sp/P = 1,8%).

Tableau 3.2 : Valeur d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant

Superplastifiant (%)	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
Etalement (mm)	292	300,5	302,5	306,5	306,5	315

b- Temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour mortiers

Les résultats de l'effet des superplastifiants sur le temps d'écoulement sont donnés dans le Tableau 3.3 et illustrés sur la Figure 3.4.

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)	14,9	8,50	8,11	7,48	8,47	8,10

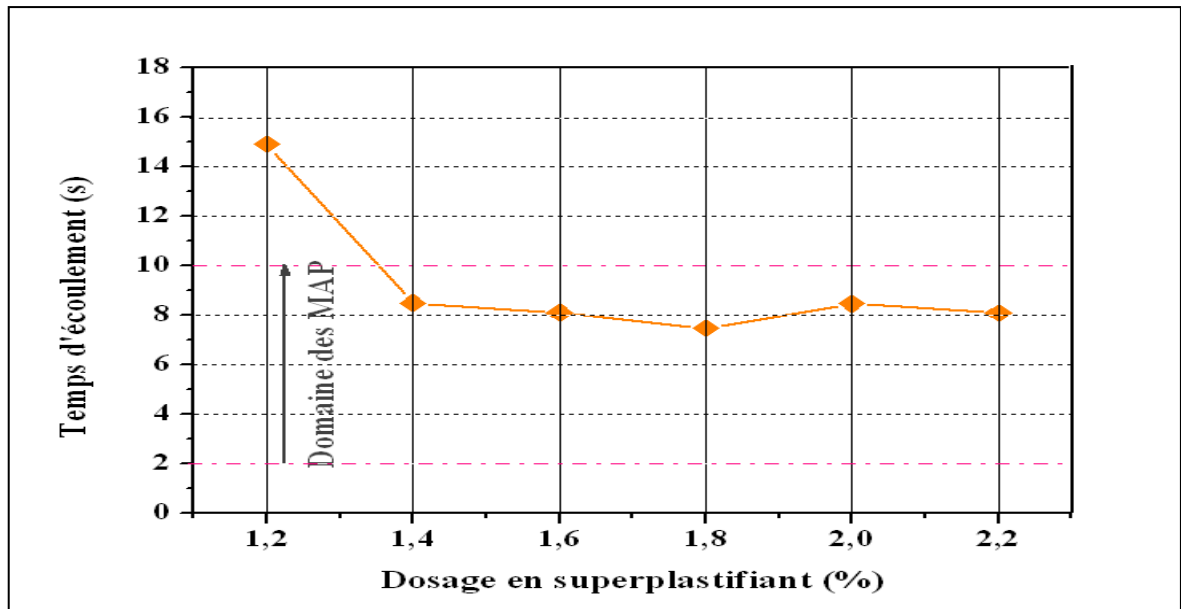


Figure 3.4 : Temps d'écoulement du mortier en fonction du dosage en superplastifiant.

La Figure 3.4 montre que le temps d'écoulement des mortiers à l'entonnoir en V diminue avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant, jusqu'à un certain dosage de 1,8%, où à partir duquel le temps d'écoulement augmente légèrement. On appelle le point d'intersection des deux parties de la courbe point de saturation, c'est-à-dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation de dosage en superplastifiant n'a plus de répercussion sensible sur la rhéologie du mortier alors, il y a une saturation du système par le superplastifiant. La quantité de superplastifiant ajouté peut être divisée en une partie consommée par les réactions chimiques et une partie absorbée sur la surface des grains qui n'est pas intégrée dans la composition du produit d'hydratation. Cette partie est la plus importante pour la dispersion des grains par répulsion électrostatique, qui n'est pas facile à mesurer. Il y a également la partie du superplastifiant dans la solution, son rôle n'est pas clair [54]. On peut observer aussi selon la Figure 3.4 que tous les dosages en superplastifiant permettent d'atteindre des valeurs de temps d'écoulement acceptables (entre 2 et 10 sec) [70], à l'exception des dosages inférieurs à 1,2%. Ceci est dû principalement à l'insuffisance du dosage en superplastifiant qui ne permet pas de défloculer convenablement l'empilement des grains de ciment. À cet effet, on peut dire que le dosage en superplastifiant influence graduellement la fluidité des mortiers; son augmentation se traduit par une diminution des temps d'écoulement, ce qui provoque un abaissement du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique des mélanges.

Donc, plus on augmente le dosage en superplastifiant, plus on abaisse le seuil de cisaillement et la viscosité, néanmoins cette augmentation n'a qu'une influence limitée sur la viscosité.

L'utilisation d'un dosage en superplastifiant qui dépasse 1,8% du poids de ciment donne un mortier autoplaçant avec un diamètre d'étalement important qui facilite considérablement la mise en place du béton même dans le cas d'un ferrailage dense. Cependant, le prix de revient sera très coûteux pour le maître de l'ouvrage et retarde considérablement la prise du béton et provoque une diminution de la cadence du travail. Donc, le dosage en superplastifiant ne doit pas dépasser un seuil au-delà duquel le superplastifiant n'entraîne pas des modifications notables de la rhéologie du mélange, ce dernier peut augmenter la friction entre les granulats et diminuer la cohésion du mélange, on assistera alors à une hétérogénéité du mélange.

En conclusion, le dosage en superplastifiant au point de saturation est le dosage nécessaire pour avoir des meilleures propriétés rhéologiques possibles d'un mélange avec ce superplastifiant. Afin d'éviter les effets secondaires indésirables des superplastifiants, il est préférable d'utiliser le pourcentage optimal Sp/L dans les mélanges de béton qui est de 1,8%. Les résultats obtenus confirment ceux obtenus par Boukendakdji et al. [8].

3.3 Effet du taux de substitution du laitier sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais

Il s'agit d'étudier l'effet de la substitution du ciment par le laitier d'El-Hadjar sur les différentes propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais conformément aux recommandations AFGC [18], notamment la mobilité en milieu non confiné et confiné, ainsi que la stabilité (la résistance à la ségrégation et au ressuage). A cet effet, nous avons tout d'abord formulé un BAP de référence (BAP R) sans aucune addition en s'appuyant sur les résultats d'optimisation obtenus sur le mortier, où on a pu avoir le rapport superplastifiant/poudre (Sp/P) de 1,8%. Pour toutes les compositions des bétons utilisés dans la présente travail, nous avons fixé le rapport S/M à 0,50, le rapport E/C à 0,40, et le rapport Sp/P à 1,8%. La finesse du laitier a été maintenue constante à $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$. On a varié uniquement les teneurs en laitiers de 10, 15, 20 et 25% par rapport à la masse du ciment de façon à étudier l'effet direct de substitution. Les différentes compositions des BAP sont reportées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Composition des BAP étudiés

Compositions	Unité	BAP R 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4	BAP 5
		0% L	10% L	15% L	20% L	25% L
Ciment	kg/m ³	494,10	444,69	419,99	395,28	370,58
Laitier	kg/m ³	0	46,17	69,26	92,34	115,43
Gravier (3/8)	kg/m ³	244,10	244,10	244,10	244,10	244,10
Gravier (8/15)	kg/m ³	489,02	489,02	489,02	489,02	489,02
Sable	kg/m ³	925,90	925,90	925,90	925,90	925,90
Eau	kg/m ³	188,07	188,11	188,13	188,15	188,17
Superplastifiant	kg/m ³	8,89	8,84	8,81	8,78	8,75

Les essais de caractérisation de ces bétons ont été effectués selon les procédures décrites par les guides Européens du BAP [66], dont les valeurs limites sont données dans le Tableau 3.5. Les résultats expérimentaux des essais sur l'ouvrabilité des différents bétons autoplaçants à base de laitier sont donnés dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.5 : Valeurs préconisées pour les essais (EFNARC) du BAP

Essai	Unité	Valeurs limites	
Essai d'Étalement	Étalement S	mm	550 - 850
	Temps d'Écoulement T ₅₀	sec	2 - 5
Essai J-Ring	Temps d'Écoulement T _{50J}	sec	/
	Étalement S _J	mm	/
	Différence d'Hauteurs B _J	mm	0 - 10
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 ₂ /H ₁)	/	0,8 - 1
	T ₂₀	sec	/
	T ₄₀	sec	/
Essai U-Box	Différence d'Hauteur (h ₂ - h ₁)	mm	0 - 30

(/) Ne sont pas mentionnés.

Tableau 3.6 : Résultats d'essai d'ouvrabilité des BAP à l'état frais

		BAP R 1 0% L	BAP 2 10% L	BAP 3 15% L	BAP 4 20% L	BAP 5 25% L
Essai d'Étalement	Temps d'Écoulement T_{50} (sec)	2,67	2,40	1,98	2,45	2,79
	Étalement S (mm)	764	775	782	795	801
Essai J-Ring	Temps d'Écoulement T_{50J} (sec)	3,46	3,11	2,53	3,74	4,27
	Étalement S_J (mm)	684	706	734	740	744
	Différence d'Hauteurs B_J (mm)	33	12,5	9,80	12,70	16,90
Essai V- Funnel	Temps d'Écoulement (sec)	9,70	8,31	6,85	12,86	17,90
Essai de ségrégation sur Tamis de 5 mm	Laitance passant à travers le Tamis (%)	4,52	7,13	8,84	15,25	19,95
Essai L-Box	Rapport des Hauteurs (H_2/H_1)	0,63	0,78	0,83	0,88	0,89
	T_{20} (sec)	2,91	1,87	1,44	1,83	1,94
	T_{40} (sec)	4,10	2,92	2,78	3,10	3,52
Essai U-Box	Différence d'hauteur ($h_2 - h_1$) (mm)	23	16	8	37	55

3.3.1 Mesures d'étalement et du temps T_{50} au cône d'Abrams

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures. Le critère d'ouvrabilité pour un BAP c'est le critère d'écoulement non confiné représenté par l'essai d'étalement au cône d'Abrams. Dans cette étude, la mesure de l'ouvrabilité des BAP a été mesurée conformément à la norme EN 12350-8 [75]. Les résultats obtenus de l'étalement des BAP en fonction de la teneur en laitier sont représentés sur la Figure 3.5. En augmentant le pourcentage de laitier dans les mélanges de BAP, on constate un accroissement progressif de l'étalement et par conséquent l'ouvrabilité. En comparaison avec le béton référence (BAP R 1), cette augmentation est de l'ordre de 1, 2, 4, et 5% pour les bétons avec 10, 15, 20 et 25% de laitier, respectivement.

Il faut rappeler qu'un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 550 et 850 mm à l'essai d'étalement est considéré comme un béton autoplaçant selon les recommandations d'EFNARC [6]. D'après la Figure 3.5, on constate que tous les BAP ont des valeurs d'étalement comprises entre 764 mm et 801 mm, et par conséquent sont situées à l'intérieur du domaine des BAP classe SF3 qui sont caractérisé par une bonne déformabilité.

D'autre part, au cours des essais on a remarqué que lorsque la teneur en laitier est supérieure à 15%, la fluidité devient très importante et une ségrégation statique et ressuage sont détectés. Par conséquent, la teneur en laitier entre 0 et 15% conduit à des résultats satisfaisants en termes de mobilité du béton en milieu non confiné. En plus, dans cette plage on a remarqué que les gros granulats ont été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton. Selon ces résultats expérimentaux on peut dire que le dosage optimale de substitution de ciment par du laitier est de 15%.

L'influence des additions minérales sur l'écoulement des bétons est fonction de leur dosage et de leur état (inerte ou actif) [76]. Les particules fines de l'addition remplissent les vides disponibles entre les particules du béton, augmentant ainsi la compacité du mélange en améliorant l'arrangement total des particules dans la matrice [77]. Par conséquent, la quantité d'eau qui occupait ces vides est libérée dans la solution

interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité. D'autres chercheurs [78] ont trouvé que l'utilisation de cendre volante et le laitier de haut fourneau dans le BAP réduit le dosage de superplastifiant nécessaire pour obtenir un étalement similaire par rapport au béton formulé seulement par un ciment Portland.

Boukendakdji et al. [8] ont conclu que pour les deux superplastifiants PC et PNS, le pourcentage de 15% de laitier est optimal du point de vue ouvrabilité. Behim et Boucetta [7] ont montré que la fluidité du béton augmente considérablement en fonction de l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à un dosage 30% ; au-delà de cette valeur ils ont noté, plutôt une diminution de l'étalement en particulier pour le BAP avec 60% de laitier comme substitution du ciment.

Gesoglu et al. [79] ont aussi constaté que le laitier a une influence significative sur l'étalement. L'incorporation de laitier à raison de 20 et 40% dans le béton améliore son ouvrabilité. Cependant, une diminution de l'étalement du béton est notée pour des pourcentages de laitier de 60%. Cette réduction est due principalement aux particules du laitier qui est considéré comme une addition à caractère pouzzolanique dont sa demande en eau est importante par rapport au ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité du béton pour certain dosage [7].

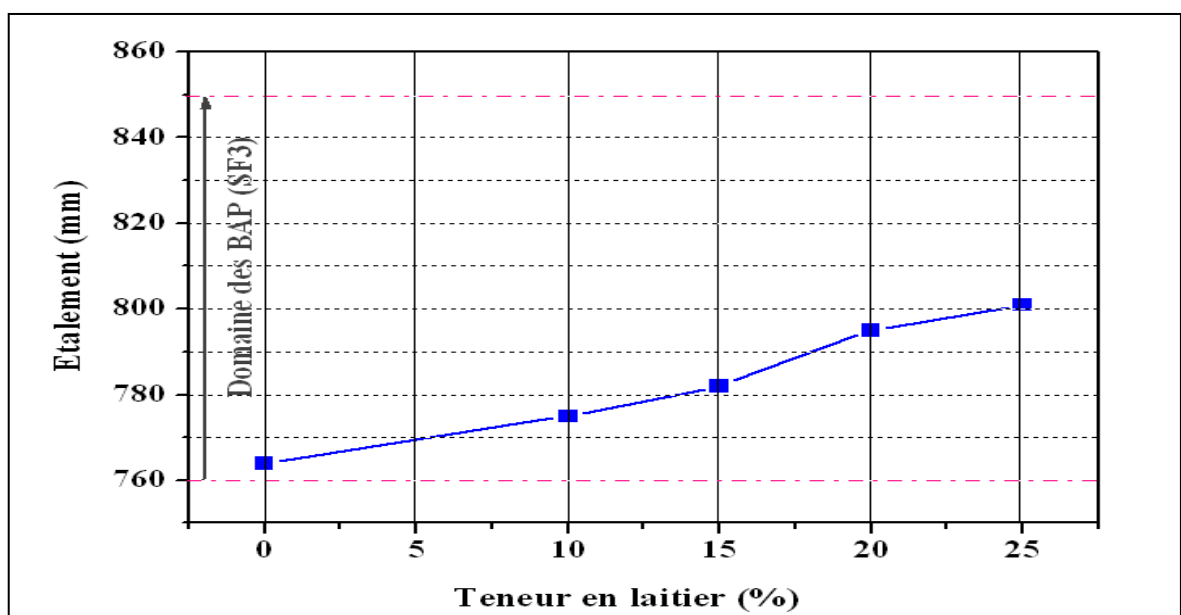


Figure 3.5 : Étalement en fonction de la teneur en laitier.

Guneyisi et al. [50] 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 production de béton (Tableau 3.7).

Tableau 3.7 : Résultats de cône d'Abrams de BAP [50]

Rapport E/L	0,32				0,44			
Laitier (%)	0 L	20 L	40 L	60 L	0 L	20 L	40 L	60 L
Etalement (mm)	670	700	700	730	670	670	710	705

Cependant, Diamantonis et al. [80] ont montré que la pouzzolane naturelle (PZN) un effet inverse du laitier sur le comportement rhéologique de BAP. La substitution du ciment portland par la PZN (20% à 40%) a augmenté la valeur de seuil d'écoulement des BAP d'une manière significative en fonction du taux de substitution ce qui peut être traduit par un étalement plus faible que celui du BAP sans ajout. Bethmont [81], a trouvé une bonne corrélation entre le seuil de cisaillement extrapolé par le modèle de Herschel Bulkey et l'étalement, dans le sens où le diamètre d'étalement est inversement proportionnel au seuil d'écoulement (τ_0).

Siad [82] a étudié des BAP à base de PZN pour trois classes de résistance 30, 50 et 70 MPa, et des taux de substitutions du ciment par la PZN de 50, 33 et 13%, avec un étalement constant de 660 ± 10 mm. Il a constaté que plus la teneur en PZN augmente plus le rapport E/L augmente (de 0,4 à 0,7%) et inversement le rapport SP/L (de 2 à 0,7%).

Le deuxième paramètre saisi à travers l'essai de l'étalement au cône d'Abrams T_{50} c'est le temps nécessaire pour atteindre un diamètre de 50 cm. La variation de temps d'écoulement en fonction de la teneur en laitier est illustrée sur la Figure 3.6. On remarque que le temps d'écoulement est toujours inférieur à 5 s pour tous les bétons respectant ainsi la limite supérieure d'EFNARC [6]. D'autre part, une diminution progressive de temps d'écoulement de l'ordre de 10 et 25% est observée pour un pourcentage de laitier de 10% et 15%. L'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange optimale est obtenue pour

un taux de laitier de 15%. Au delà de 15% de laitier, on constate une croissance du temps d'écoulement jusqu'à 25% de laitier.

Gesoğlu et al. [79] ont aussi remarqué que l'emploi des ajouts minéraux augmentent légèrement la valeur de T_{50} et principalement dans le cas des BAP à base du fumée de silice.

A travers l'essai étalement au cône d'Abrams, on peut conclure que la composition BAP 3 qui contient un pourcentage de laitier 15% présente un bon étalement sans ségrégation et sans ressuage et avec un temps d'écoulement T_{50} inférieur à 5 s, donc cette composition respecte les critères d'un BAP et représente le pourcentage optimale du point de vue ouvrabilité.

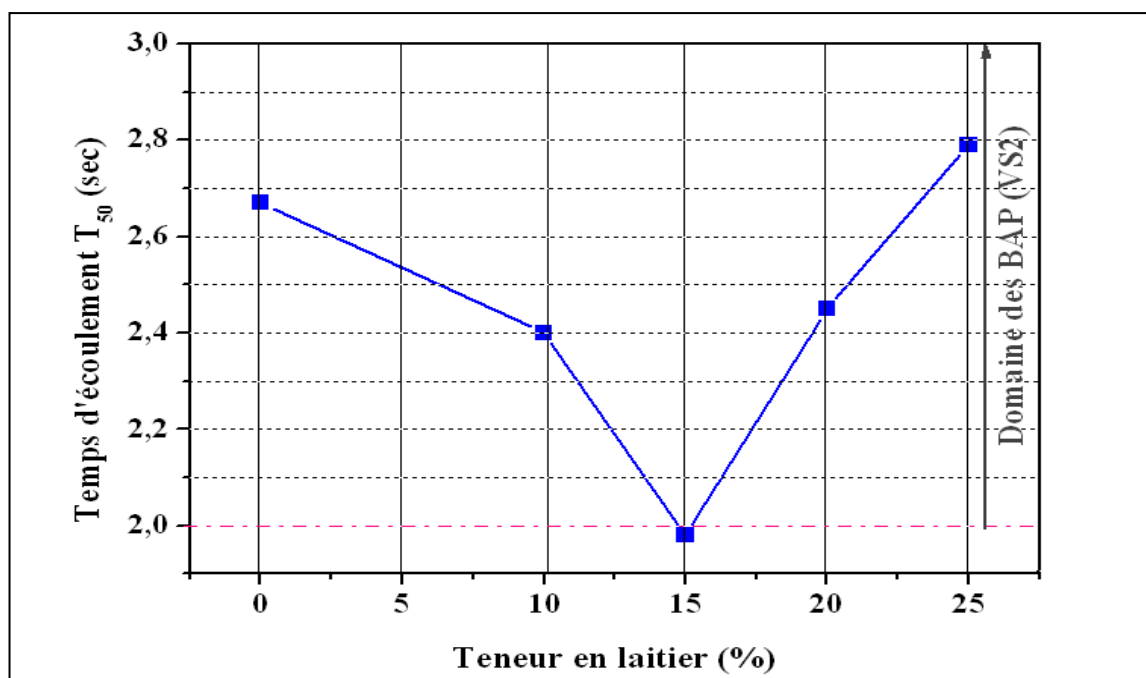


Figure 3.6 : Temps d'écoulement T_{50} en fonction de la teneur en laitier.

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

En plus de l'essai étalement au cône d'Abrams, l'essai de V-entonnoir a été également réalisé pour évaluer la fluidité et la stabilité du BAP. La Figure 3.7 montre l'effet de la teneur en laitier sur le temps d'écoulement à l'entonnoir en V. On note que les valeurs de temps d'écoulement sont de l'ordre de 6,85 à 17,90 s dépendant principalement du pourcentage de l'addition minéral utilisé. Le plus bas temps d'écoulement de 6,85 s a été

mesuré pour le BAP 3 (15% L) tandis que le mélange avec 25% L avait le temps d'écoulement le plus élevé de 17,90 s. Les mélanges BAP 4, BAP 5 n'ont pas satisfait le temps limite d'écoulement (12s) recommandé par EFNARC [6]. En plus, on a remarqué un flux discontinu pour ces deux mélanges et par conséquent un risque de ségrégation dynamique. Un temps d'écoulement trop long et un flux discontinu peuvent indiquer une séparation des granulats de la matrice et la formation de voûtes bloquant l'écoulement [81].

Bethmont [81], a remarqué que la majorité des auteurs s'accordent sur le fait que la viscosité est bien corrélée au temps d'écoulement mesuré au V-Funnel et éventuellement au T_{50} . Par conséquent, on peut conclure que la substitution du ciment par la le laitier augmente la viscosité de mélange à partir de taux de substitution de 15% de laitier.

Des résultats similaires ont été obtenus par Siddique [83] avec les cendres volantes, où 20% de cendres volantes ont donné le temps d'écoulement le plus court (4,5 sec).

Boukendakdji et al. [8] ont constaté que les valeurs de temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) sont acceptables jusqu'à 20% de laitier pour les mélanges de béton confectionnés avec les deux types de superplastifiant PC et PNS.

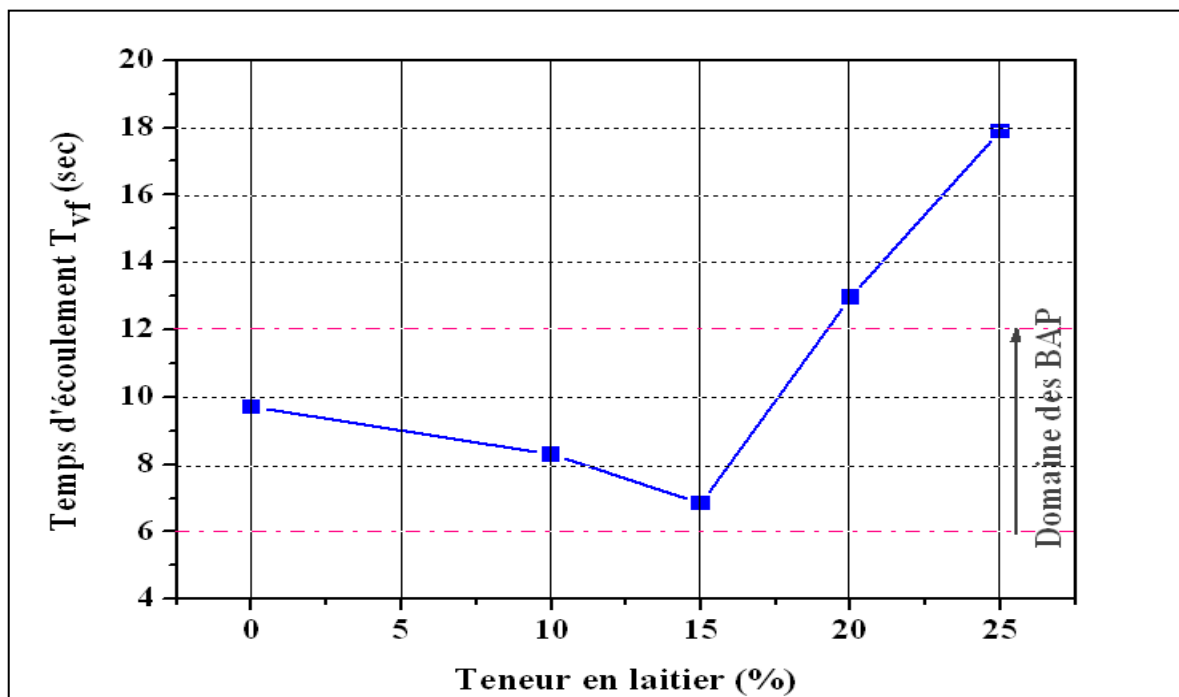


Figure 3.7 : Temps d'écoulement à l'entonnoir en V en fonction de la teneur en laitier.

Uysal et Sumer [84] ont étudié l'effet du calcaire, les cendres volantes, le laitier, la poudre de basalte et la poudre de marbre sur le temps d'écoulement au V-Funnel. Ils ont trouvé que toutes les formulations n'ont pas vérifié la marge du T_{V-F} admissible. Par conséquent, un T_{V-F} supérieur à 15 s serait très cohésif et difficile à manipuler.

Diamantonis et al. [80] ont trouvé que la substitution du ciment portland par la PZN (20% et 40%) augmente légèrement la valeur du temps d'écoulement à l'entonnoir en V, autrement dit, une augmentation de la viscosité plastique des BAP.

3.3.3 Mesures du rapport H_2/H_1 , les temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de l'essai de la boîte en L (L-Box)

Dans cette partie, nous avons étudié le comportement des bétons BAP à l'écoulement dans un milieu confiné qui est traduit par l'essai de la boîte en L-Box. La caractéristique de l'essai est qu'il donne une bonne appréciation sur les trois capacités, de remplissage, de passage et de la résistance à la ségrégation. En plus, l'aspect rhéologique est exprimé par l'analyse des temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de la même boîte.

(a) Mesure le rapport H_2/H_1

Les résultats de rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en laitier obtenus par l'essai L-Box sont présentés sur la Figure 3.8. Tous les mélanges donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des BAP, à l'exception le BAP R et BAP 2 qui donne une valeur de H_2/H_1 de l'ordre de 0,63 et 0,78, respectivement. La raison de la faible valeur de H_2/H_1 peut être dû au manque de cohésion de ces mélanges et par conséquent un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage qui est dû un amoncellement de granulats au niveau de la grille qui sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation. La substitution de ciment de 15 à 25% par le laitier dans les mélanges améliore la capacité de remplissage et de passage de BAP avec une valeur optimale à 15% de laitier.

Gesoglu et al. [79] ont observé clairement que tous les BAP fabriqués avec des mélanges ternaires et quaternaires à base des additions minérale telle que laitier, cendres volantes, fumée de silice ont eu les rapports H_2/H_1 de 0,82 à 0,93. Par contre, les mélanges binaire avec ou sans laitier, présentent une faible cohésion et par conséquent, plus de risque de blocage que les autres mélanges.

Récemment, Boukendakdji et al. [8] ont montré que pour les deux types de superplastifiants PC et PNS, plus le pourcentage de laitier augmente plus le rapport H_2/H_1 tend vers 1, mais avec une valeur optimale à 15% de laitier ; au-delà de 15% de laitier, le rapport augmente mais les mélanges accusent une certaine ségrégation.

Guneyisi et al. [50] ont démontré que le rapport H_2/H_1 est influencé par trois paramètres, le rapport E/L, la quantité et le type des additions minérales. L'augmentation du premier paramètre mène vers une diminution du rapport H_2/H_1 mais l'augmentation du dosage en ajout mène vers une augmentation du rapport H_2/H_1 mais cette variation dépend principalement du type de l'addition.

Behim et Boucetta [7] ont constaté qu'au-delà de 30% de laitier une diminution des taux de remplissage due à l'augmentation de la viscosité du béton, ceci rend difficile l'écoulement et entraîne un blocage du béton.

La mobilité du BAP avec du laitier ou un mélange laitier-cendres volantes est beaucoup plus élevée que celle du BAP avec les cendres volantes uniquement. Ce dernier apparaît être très cohésif et donc plus lent que les autres mélanges [85].

Sonebi et al. [86] ont démontré que le rapport H_2/H_1 est influencé par trois paramètres, le dosage en eau, le dosage en superplastifiant et la quantité de gros granulats dans le mélange. L'augmentation des deux premiers paramètres mène vers l'augmentation du rapport H_2/H_1 mais l'augmentation du dosage en granulats mène vers une diminution du rapport H_2/H_1 et augmente le risque de blocage des gros granulats derrière les bars d'aciers du L-Box.

(b) Mesure du temps d'écoulement T_{20} et T_{40}

Les Figures 3.9 et 3.10 montrent les variations des temps d'écoulement T_{20} et T_{40} pour arriver à la distance de 20 et 40 cm, respectivement, de la boîte en L en fonction de la teneur en laitier.

Ces figures montrent que le temps d'écoulement T_{20} et T_{40} diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier, jusqu'à un certain dosage qui représente un pic situé exactement pour une teneur de 15% en laitier, mais au-delà de cette valeur le temps d'écoulement augmente jusqu'à 25% de substitution par le laitier. Cette augmentation est due à la présence de

ségrégation dans les mélanges qui peut être caractérisée par le blocage des gros granulats derrière les bars d'aciers.

Bien qu'aucune limite ne soit donnée pour les temps d'étalement T_{20} et T_{40} , mais certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1,5 secondes pour T_{20} et inférieures à 3,5 secondes pour T_{40} afin de rester dans le domaine des bétons autoplaçants [72]. Les Figures 3.9 et 3.10 confirment bien que la substitution le ciment de 15% par le laitier vérifié les deux bornes de temps.

Ces résultats sont en accord avec les résultats de Boukendakdji et al. [8] qui ont trouvé que le meilleur temps d'écoulement est enregistré pour un pourcentage de 15% puis ce dernier augmente indépendamment de la nature du superplastifiant.

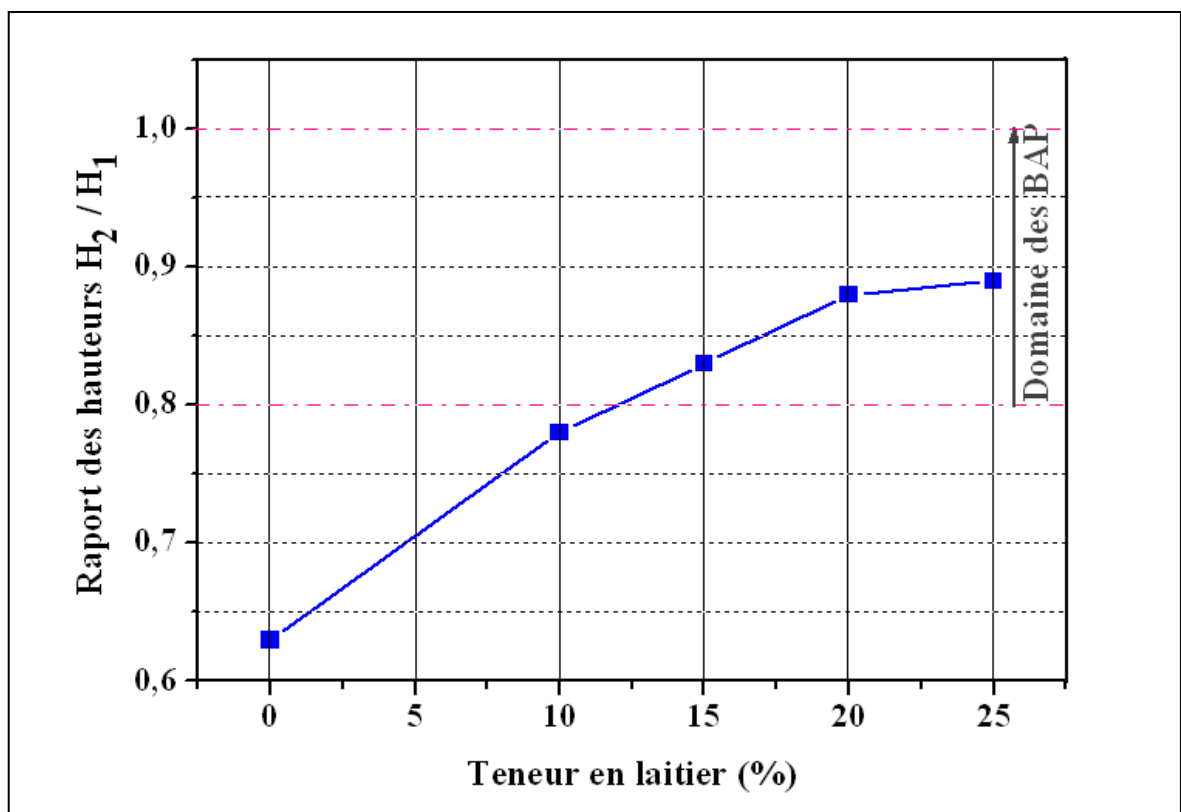


Figure 3.8 : Rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en laitier.

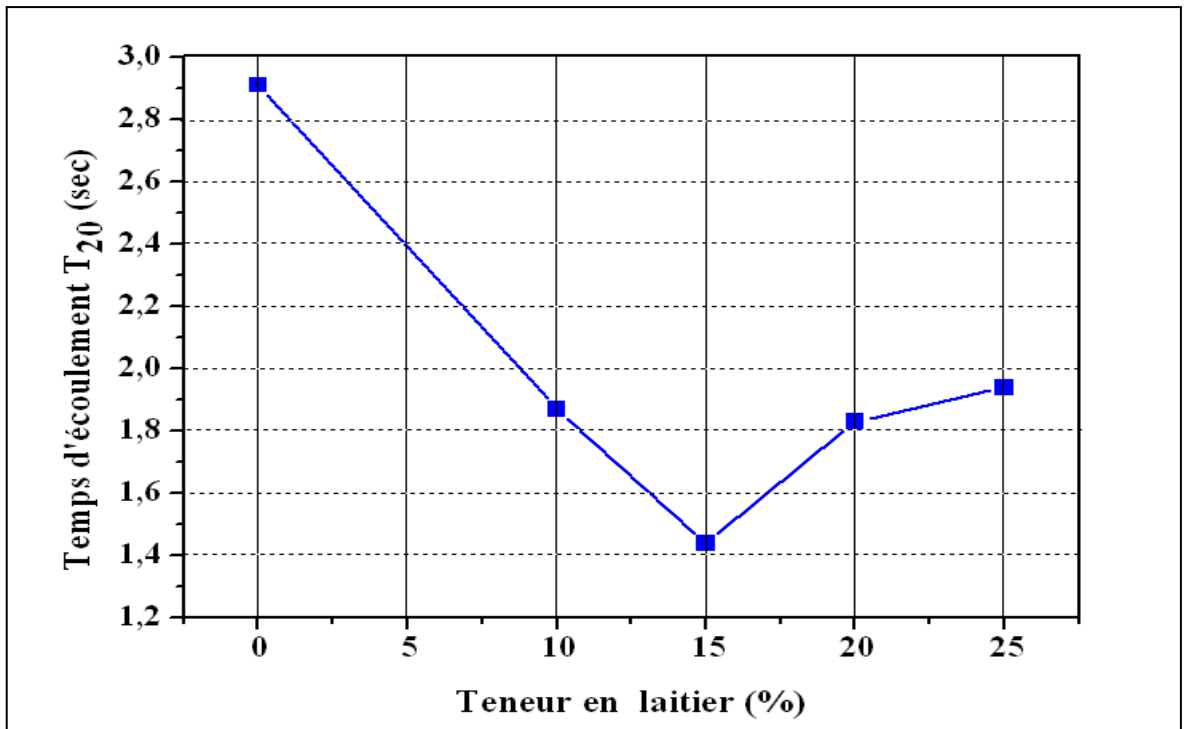


Figure 3.9 : Temps d'écoulement T_{20} en fonction de la teneur en laitier.

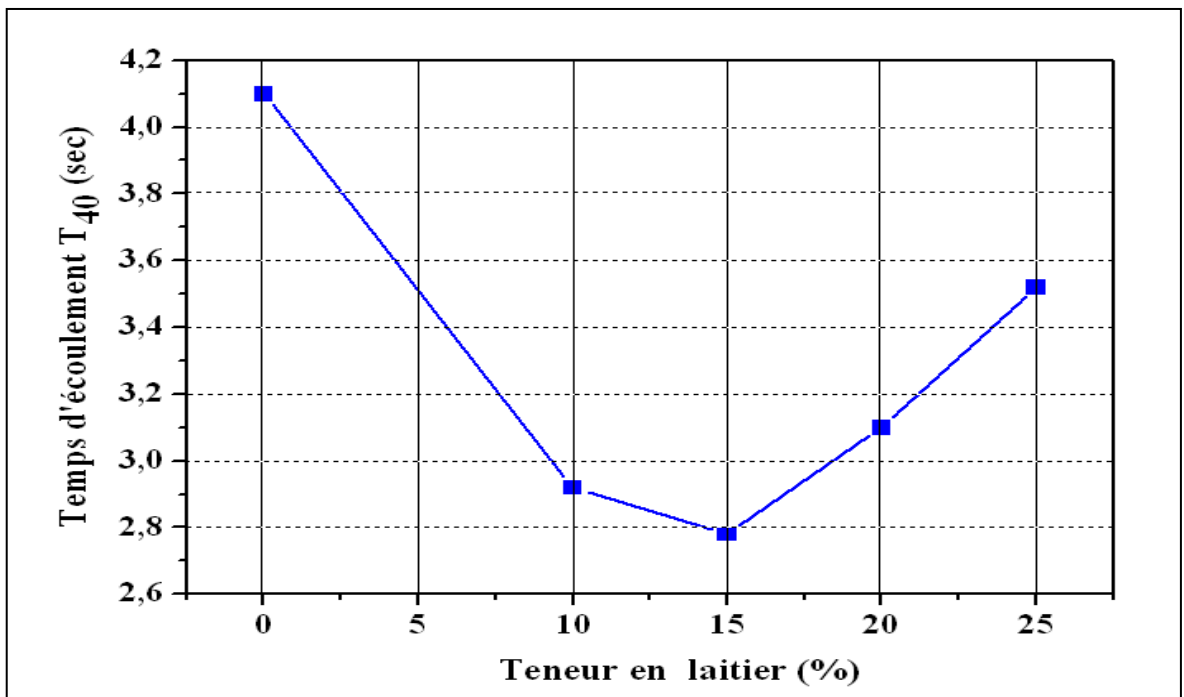


Figure 3.10 : Temps d'écoulement T_{40} en fonction de la teneur en laitier.

3.3.4 Mesures d'étalement, temps T_{50J} et différence de hauteur B_J au cône d'Abrams en présence du J-Ring

Afin de vérifier la capacité d'un béton à s'écouler à travers des armatures, la capacité de remplissage et de la résistance à la ségrégation, le J-ring test peut également être employé. Il s'agit d'un anneau sur lequel différentes armatures peuvent être fixées. Ce matériel est utilisé conjointement avec un essai d'étalement au cône d'Abrams, ou éventuellement un essai au V-Funnel. D'après l'EFNARC [6], la combinaison de ces essais est intéressante mais on ne sait pas encore comment interpréter les résultats. Par exemple, il est possible de comparer un essai d'étalement seul et un essai combiné : étalement et J-ring. La différence entre les étalements obtenus ne doit pas être supérieure à 50 mm [6]. Pour cette raison, on fait une comparaison entre les mesures d'étalement sans et en présence du J-Ring et on a fait aussi une comparaison du temps d'écoulement T_{50} . Il est également possible de mesurer la différence entre les hauteurs de matériau obtenues à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring. Cette opération est délicate à réaliser et peu précise.

(a) Mesure d'étalement

La Figure 3.11 montre les résultats expérimentaux de la variation de l'étalement sans et avec le dispositif J-Ring (D et D_J) en fonction de la teneur en laitier.

On remarque une évolution croissante de l'étalement aux BAP avec l'augmentation du pourcentage en laitier. Cela veut dire que, l'augmentation du pourcentage de substitution de ciment par le laitier permet d'améliorer la fluidité des BAP en milieu confiné. Les grains du laitier se caractérisent par des surfaces vitreuses lisses à faible taux d'absorption ce qui permet un meilleur glissement inter-granulaire dans la pâte et dans le mélange des BAP. De plus, le laitier ayant une granulométrie différente à celle du ciment, cette granulométrie permet d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange, ce qui permet d'avoir une bonne et meilleur fluidité du béton [21].

On peut observer également que la différence entre les étalements sans et avec J-Ring sont de l'ordre de 48 à 80 mm, ce qui est en mauvais accord avec la valeur 50 mm recommandée par la norme EFNARC [6]. Cependant, le taux de substitution de 15% satisfait les performances recherchées de fluidité avec faible tendance de ségrégation et d'enrobage complet des armatures. En plus, lors de l'essai, on a remarqué que le mélange

BAP 3 s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau. Au delà de 15%, on a décelé lors de l'écoulement un problème de blocage par formation de voûtes des granulats avec présence une ségrégation après repos.

Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Boukendakdji et al. [8], qui ont observé une ségrégation visible par le blocage des gros granulats à l'intérieur de l'anneau (J-Ring) pour les teneurs en laitier dépassant 15%.

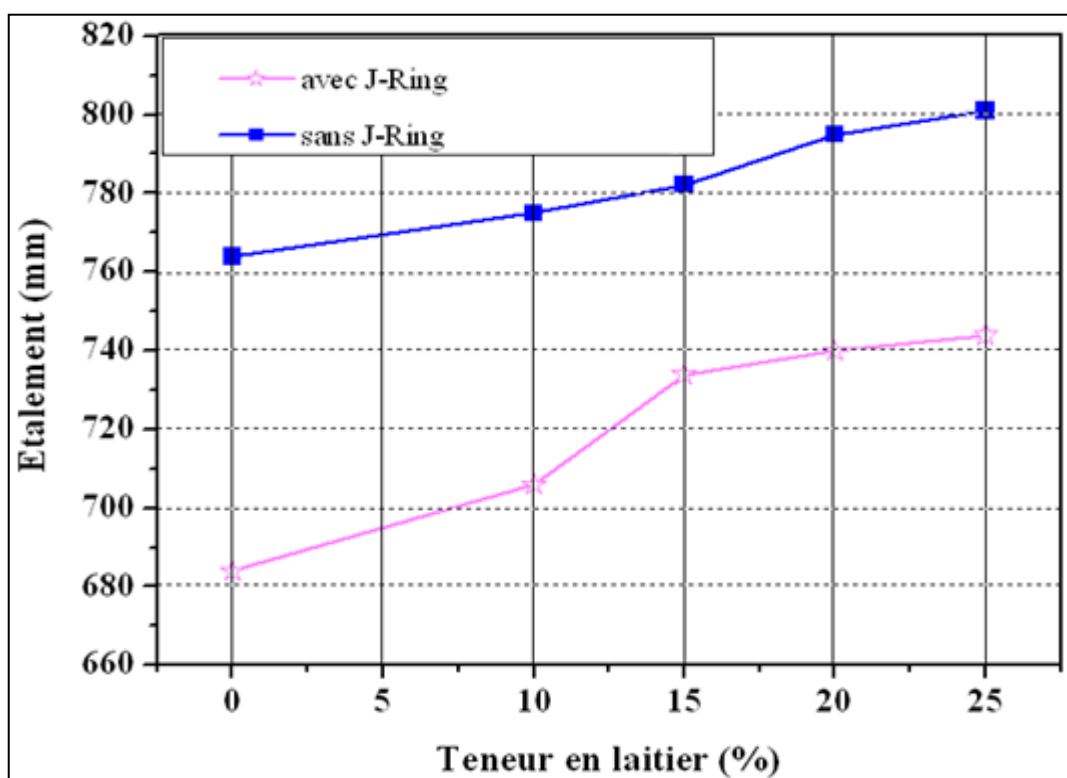


Figure 3.11 : Etalement avec et sans J-Ring en fonction de la teneur en laitier.

(b) Mesure le temps d'écoulement T_{50} .

La variation de temps d'écoulement sans et avec le J-Ring (T_{50} et T_{50j}) en fonction de la teneur en laitier est présentée sur les Figures 3.12.

Nous pouvons remarquer que le temps d'écoulement T_{50} a le J-Ring a eu la même évolution que celui avec le dispositif J-Ring. Il a présenté un minimum pour une substitution de 15% par le laitier puis il a augmenté avec l'augmentation de la substitution

pour 20% et 25% du laitier. Cela veut dire que pour les mélanges BAP4 et BAP5 l'écoulement a eu un freinage, ce freinage peut être expliqué par une présence de ségrégation.

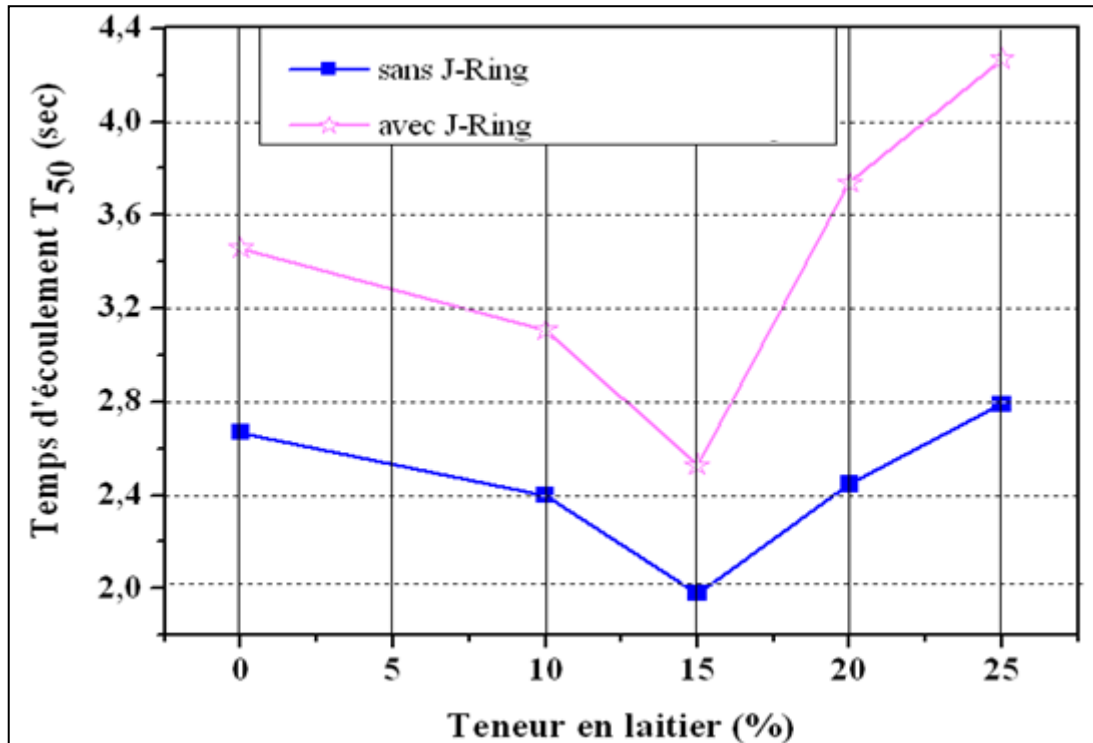


Figure 3.12 : Temps d'écoulement avec et sans J-Ring T_{50j} en fonction de la teneur en laitier.

(c) Mesure de la différence d'hauteurs au cône d'Abrams

La Figure 3.13 représente l'influence de la teneur en laitier sur la différence de hauteurs au cône d'Abrams en présence le J-Ring. On remarque que la différence de hauteurs de tous les BAP obtenues à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring est dans la gamme de 9,80 – 33 mm. On observe aussi que seule la composition BAP 3 (15% de laitier) respecte la condition de l'essai ($0 \text{ mm} < B_j < 10 \text{ mm}$), exigé par EFNARC [6]. Cette composition représente une stabilité satisfaisante et une bonne capacité de passage et de remplissage en raison de la quantité optimale de laitier. Ces résultats ont été confirmés par Boukendakdji et al. [8].

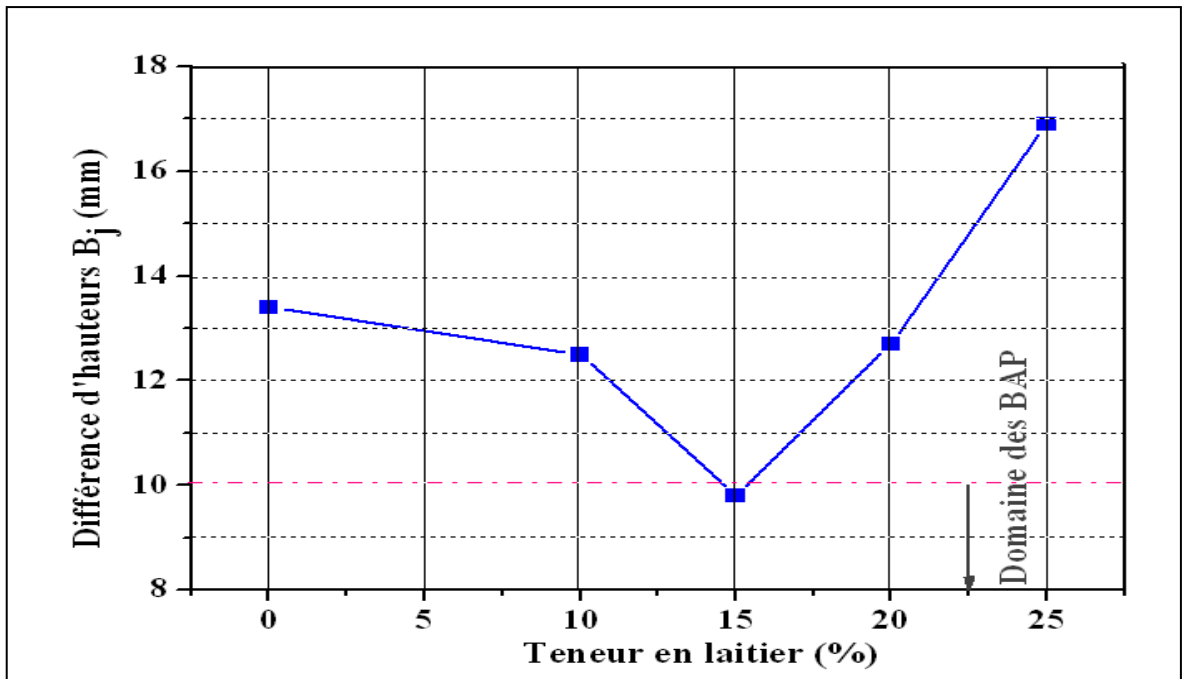


Figure 3.13 : Différence de hauteurs B_j en fonction de la teneur en laitier.

3.3.5 Mesure de la hauteur de remplissage à la boîte en U (U-Box)

La courbe de la variation de la hauteur du remplissage à la boîte en U en fonction de la teneur en laitier est donnée sur la Figure 3.14. D'après cette courbe, nous pouvons constater que les trois compositions BAP (R), BAP 2 et BAP 3 répondent aux exigences de EFNARC [6], autrement dit, la différence de hauteur de béton dans les deux compartiments est de l'ordre de 8 - 23 mm. De ces résultats, il apparaît un meilleur écoulement à travers un milieu fortement ferrailés qui permet par la suite de remonter dans la deuxième partie du U de la boîte.

Nous pouvons aussi observer que la facilité de remplissage continue à s'améliorer jusqu'à une certaine valeur maximale, particulièrement pour 15% de laitier. Le taux d'amélioration est de l'ordre de 4,4 et 7,3% pour BAP 2, BAP 3, respectivement par rapport au béton de référence. Cependant, Au-delà, de 15% une diminution de l'ordre de 3,3 et 10% est observée pour BAP 4 et BAP 5, respectivement. Cette diminution est due à la ségrégation du béton qui provoque la séparation des constituants, s'ensuit un encombrement des gros granulats autour des armatures, ce qui conduit à une obstruction de l'écoulement du béton.

Boukendakdji et al. [8] ont trouvé que, pour les deux types de superplastifiant (PC, PNS), la meilleure hauteur est enregistrée pour 15% de laitier présent dans le mélange.

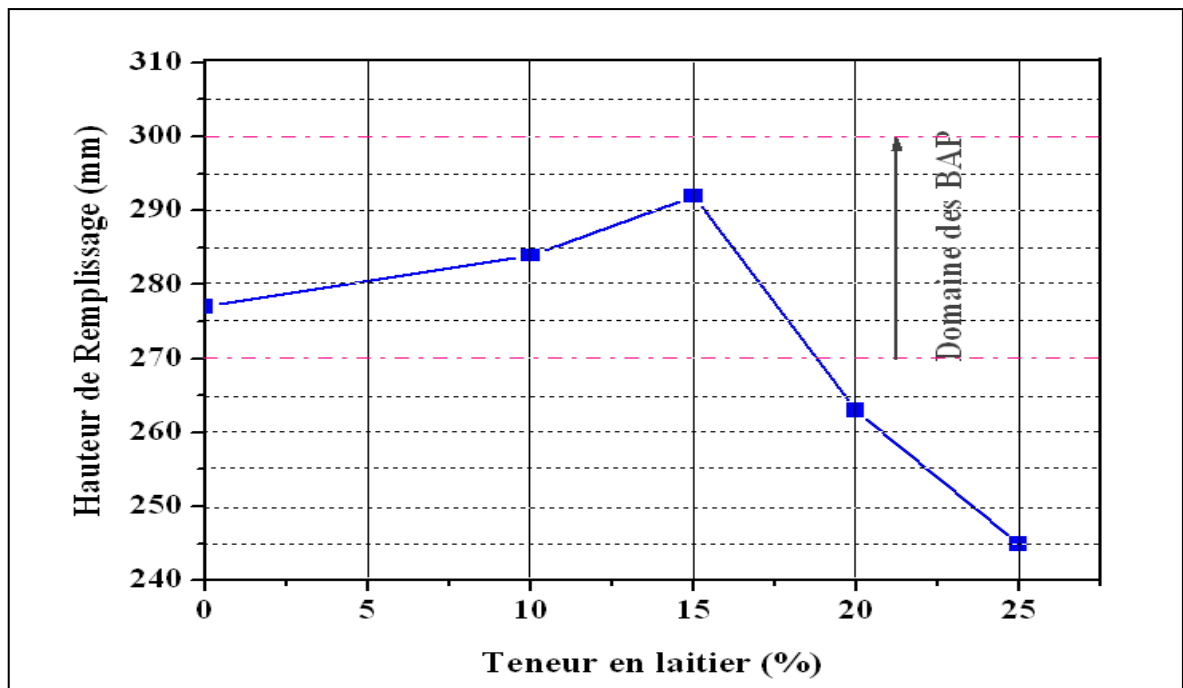


Figure 3.14 : Hauteur de remplissage à la boîte en U en fonction de la teneur en laitier.

3.3.6 Mesure de résistance à la ségrégation par tamisage

L'objectif de cet essai est d'évaluer la capacité du BAP à rester homogène après la mise en place (absence de chute verticale des gros granulats) jusqu'au début de prise : c'est la résistance à la ségrégation statique. La Figure 3.15 montre les résultats de l'essai de stabilité au tamis, il montre aussi la variation de la stabilité en fonction de la teneur en laitier. On constate que l'instabilité du béton augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier de l'ordre de 36,6% pour le BAP 2, de 48,9% pour le BAP 3, 70,4% pour le BAP 4 et 77,3% pour le BAP 5. On observe aussi que les compositions BAP (R) 1, BAP 2, BAP 3, et BAP 4 respectent la condition de l'essai, donc elles présentent une stabilité satisfaisante. Par ailleurs, la dernière composition représente une stabilité critique en raison de la quantité élevée de laitier.

Selon Boukendakdji et al. [8] les mélanges de béton avec 10 et 15% de laitier, et pour les deux superplastifiants (PC, PNS), présentent une résistance optimale à la ségrégation, mais au-delà de 15% de laitier, la présence de ressuage et de ségrégation est confirmée.

Behim et Boucette [7] ont trouvé des résultats contradictoire par rapport à notre étude, c'est-à-dire le BAP R (1) est le seul mélange qui présente un risque de ségrégation statique

($P = 18\%$), c'est le mélange le moins riche en pâte. Pour le BAP L 60, ils ont relevé une laitance $P < 5\%$, le béton est trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis.

Liu [60] a constaté qu'il y'a une amélioration de la résistance des BAP à la ségrégation pour les formulations à base de 80% et 100% de cendre volante (CV). L'indice de ségrégation de ces deux formulations ont été seulement de 5% et 7%. Ceci est conforme avec les travaux de Bouzoubaa et Lachemi [87] qui ont constaté que l'indice de ségrégation des BAP à base de cendres volantes diminue avec l'augmentation de dosage de cendres volantes qui est accompagné par une augmentation du dosage du SP et une diminution du rapport E/L.

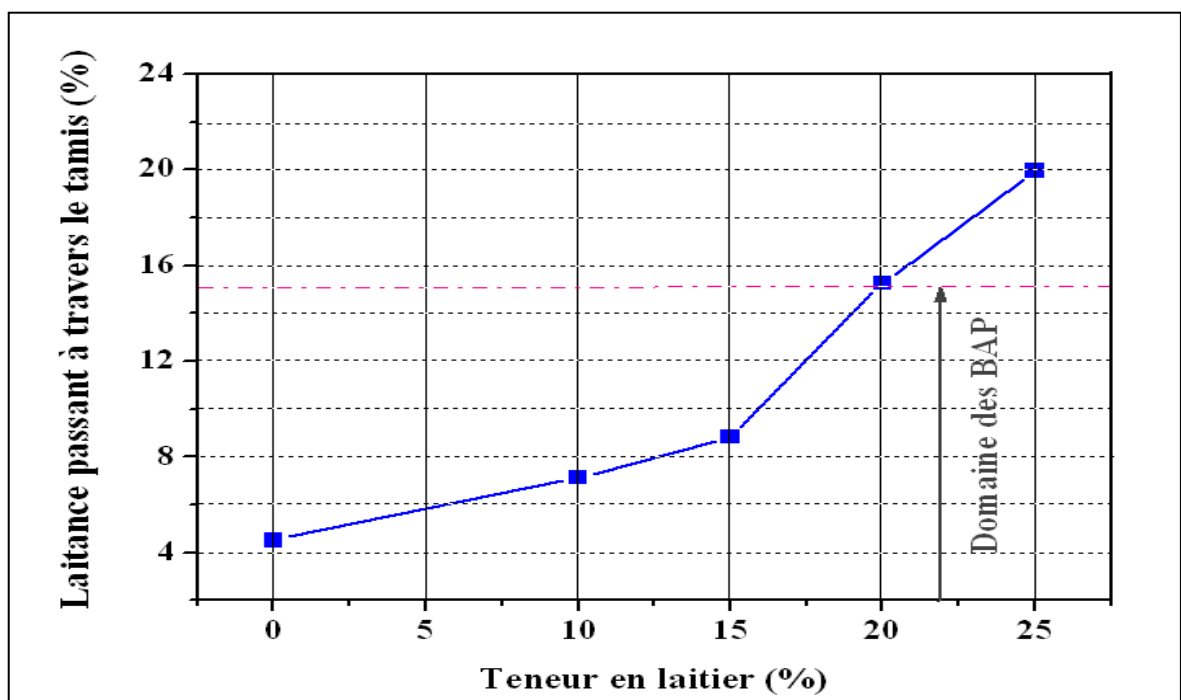


Figure 3.15 : Résistance à la ségrégation au tamis en fonction de la teneur en laitier.

3.4 Effet de la finesse du laitier (effet physique) sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais

Après avoir examiné l'influence de la substitution du ciment par le laitier de haut fourneau sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais, nous présentons dans cette partie les résultats sur les propriétés d'ouvrabilité des BAP à différentes finesses de laitier. L'influence de la finesse de laitier sur les propriétés d'ouvrabilité des BAP à l'état frais a été étudié pour les trois finesses 3500, 4200 et 5000 cm^2/g .

Les procédures suivies pour déterminer les différentes proportions des mélanges sont illustrés dans l'annexe B. Les résultats de la composition des BAP sont identiques pour les trois finesses (Tableau 3.4), et leurs confections à été faite selon les séquences décrites dans le chapitre 2 (Figure 2.8). Les Tableaux 3.8 et 3.9 donnent les résultats des différents essais sur l'ouvrabilité des quatre BAP à l'état frais pour les finesses 4200 et 5000 cm²/g, respectivement.

Tableau 3.8 : Résultats d'essai d'ouvrabilité des BAP à l'état frais (SSB : 4200 cm²/g)

		BAP 2 10% L	BAP 3 15% L	BAP 4 20% L	BAP 5 25% L
Essai d'Etalement	Temps d'Écoulement T ₅₀ (sec)	3,88	3,57	3,12	4,10
	Etalement S (mm)	662	667	675	678
Essai J-Ring	Temps d'Écoulement T _{50J} (sec)	4,4	4,17	3,80	4,61
	Etalement S _J (mm)	545	565	579	584
	Différence d'Hauteurs B _J (mm)	17	15,5	14,9	19,3
Essai V-Funnel	Temps d'Écoulement (sec)	19,26	18,02	16,53	21,96
Essai de ségrégation sur Tamis de 5 mm	Laitance passant à travers le Tamis (%)	15,42	15,92	17,39	22,96
Essai L-Box	Rapport des Hauteurs (H ₂ /H ₁)	0,35	0,44	0,50	0,64
	T ₂₀ (sec)	3,26	3,07	2,87	3,10
	T ₄₀ (sec)	5,98	5,62	5,40	5,80
Essai U-Box	Différence d'hauteur (h ₂ - h ₁) (mm)	76	69	56	81

Tableau 3.9 : Résultats d'essai d'ouvrabilité des BAP à l'état frais (SSB : 5000 cm²/g)

		BAP 2 10% L	BAP 3 15% L	BAP 4 20% L	BAP 5 25% L
Essai d'Étalement	Temps d'Écoulement T ₅₀ (sec)	4,53	4,38	3,99	4,75
	Étalement S (mm)	649	653	658	659
Essai J-Ring	Temps d'Écoulement T _{50J} (sec)	5,31	4,79	4,41	5,48
	Étalement S _J (mm)	520	534	544	550
	Différence d'Hauteurs B _J (mm)	20,25	17,30	16,75	21,75
Essai V- Funnel	Temps d'Écoulement (sec)	23,4	21,50	19,27	24,75
Essai de ségrégation sur Tamis de 5 mm	Laitance passant à travers le Tamis (%)	17,12	18,91	19,20	24,12
Essai L-Box	Rapport des Hauteurs (H ₂ /H ₁)	0,26	0,31	0,42	0,59
	T ₂₀ (sec)	3,73	3,38	3,16	3,44
	T ₄₀ (sec)	6,95	6,31	5,94	6,42
Essai U-Box	Différence d'hauteur (h ₂ - h ₁) (mm)	82	79	69	89

3.4.1 Mesure d'étalement et du temps T₅₀ au cône d'Abrams

La Figure 3.16 montre l'effet de trois finesse (3500, 4200, 5000 cm²/g) sur l'étalement au cône d'Abrams. On peut voir que l'étalement de BAP pour les trois finesse augmente en fonction du teneur en laitier et que les courbes donnant l'étalement des bétons avec une finesse de 4200 et 5000 cm²/g sont proche de celles des bétons avec une finesse de 3500 cm²/g.

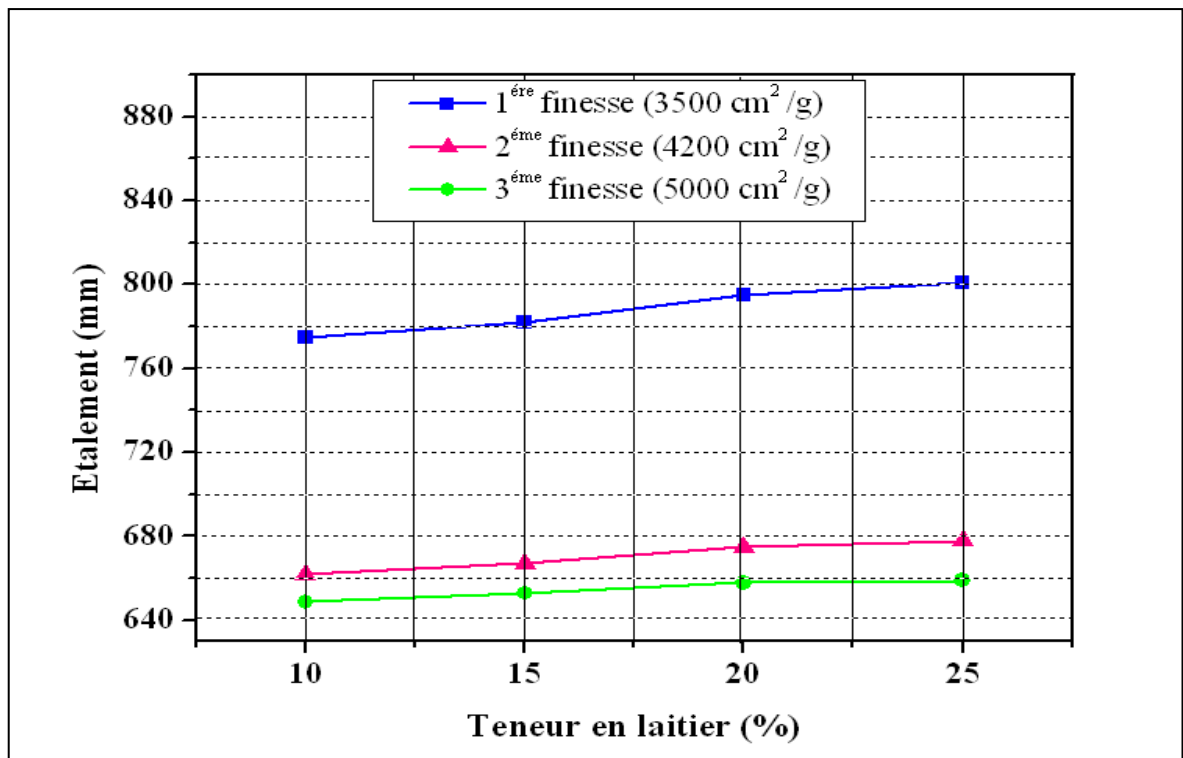


Figure 3.16 : Étalement en fonction de la teneur en laitier et sa finesse.

Les taux de diminution de l'étalement pour une finesse 4200 cm²/g par rapport une finesse 3500 cm²/g avec 10, 15, 20 et 25% de laitier sont respectivement de 14,6, 14,7 et 15%, et pour une finesse de 5000 cm²/g sont respectivement de 16,3, 16,5, 17,2 et 17,7%. L'augmentation de la surface du laitier mise en contact avec l'eau explique la diminution de l'étalement.

Selon EFNARC [6] on peut déduire que tous les BAP ont des valeurs d'étalement situées à l'intérieur de la fourchette des BAP et de classe SF3, SF2, SF1 pour les finesse 3500, 4200 et 5000 cm²/g, respectivement. Cependant, les observations visuelles pour les deux finesse 4200 et 5000 cm²/g ont montré une présence d'une accumulation de gravier au centre de la galette des mélanges et aussi une laitance en périphérie de la galette du béton.

Ces propriétés sont dues aux effets physico-chimiques du laitier sur l'ouvrabilité des bétons testés. En effet, lorsqu'on remplace une quantité de ciment par 10, 15, 20 et 25% de laitier (par substitution), la quantité des particules fines augmente dans le mélange et par conséquent, la pâte est renforcée, la fluidité se trouve améliorée et on obtient un mélange stable et maniable même pour des valeurs de finesse différentes.

L'augmentation de la finesse conduit à une augmentation du dosage d'eau due à l'augmentation de la surface de la cendre volante mise en contact avec l'eau [88].

Micah Hale et al. [89] ont montré que même s'il y avait une petite différence dans les finesses (3350 à 3500 cm^2/g) du ciment, l'affaissement des mélanges diminue avec l'augmentation de la finesse du ciment. Ils ont montré aussi que la substitution du ciment par le laitier (40%) entraîne une diminution de l'affaissement pour tous les mélanges (variation de la finesse de ciment de 3350 à 3500 cm^2/g) d'environ 5 à 45 mm par rapport de mélange de référence (sans laitier). Cette diminution peut être attribuée à la finesse plus élevée de laitier (5000 cm^2/g) par rapport de ciment par conséquent, la demande en eau augmente qui provoque une diminution de l'affaissement.

Gesoglu et al. [79] ont observé le meilleur étalement pour une finesse de laitier 4180 cm^2/g et un rapport E/L égale 0,44. L'étalement mesuré est de l'ordre de 67,5 cm, 73 cm et 72 cm pour un taux de laitier de 20, 40, et 60% respectivement. Donc pour un dosage en laitier de 20% donne des résultats similaires pour notre cas.

Les résultats trouvés dans cette étude confirment le rôle physique de laitier finement broyé qui consiste à remplir les vides entre les grains de ciment. Ce remplissage corrige la granulométrie des éléments fins dans le mélange et améliore l'étalement des BAP. En revanche, lorsque la quantité de particules fines est accrue dans le béton, l'ajout d'eau est nécessaire pour assurer sa maniabilité et sa fluidité, puisque théoriquement un matériau plus fin aura un effet d'accroissement de la demande en eau de mouillage des particules. Mnahoncakova et al. [90] ont confirmé cette idée et ont détecté que le mélange de BAP contenant des fillers calcaires demande plus eau que le mélange contenant la même quantité de cendres volantes. Ce qui était une conséquence de la petite taille des particules de fillers calcaires (maximum à 25 μm) que des cendres volantes (maximum à 125 μm). Par conséquent, la production d'un BAP contenant du filler calcaire nécessite des quantités plus élevées de superplastifiant ou d'eau.

Uysal et Yilmazk [85] ont aussi montré que l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés des bétons dépend largement de leurs granulométries, finesse ainsi que les caractéristiques de forme et de surface de leurs particules.

Oner et al. [39] ont trouvé que pour une finesse constante du clinker, la consistance normale et le temps de prise diminue avec l'augmentation de la finesse de laitier jusqu'à $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$. De même, Nacéri et Messaoudene [69] ont remarqué que les temps de début et de fin de prise augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la quantité d'ajout de laitier. Cela s'explique par le fait que la réaction chimique est retardée à court terme. Ce qui veut dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus lente en fonction de l'augmentation de la quantité du laitier ajouté. Par conséquent, les cristaux de CSH (élément responsable du phénomène de durcissement de la pâte) existent uniquement en faible quantité aux très jeunes âges. Ils ont observé aussi, que l'augmentation de la surface spécifique du laitier étudié réduit le temps de prise. En effet, les particules très fines adhèrent les unes aux autres et déclenchent le phénomène de prise de la pâte de ciment. Ainsi l'effet de la grande surface spécifique sur l'accélération de la réaction pouzzolanique réagit avec la portlandite pour former d'autres cristaux supplémentaires de CSH.

Avec le même essai, on a mesuré également le temps d'écoulement T_{50} , les résultats sont illustrés dans la Figure suivant.

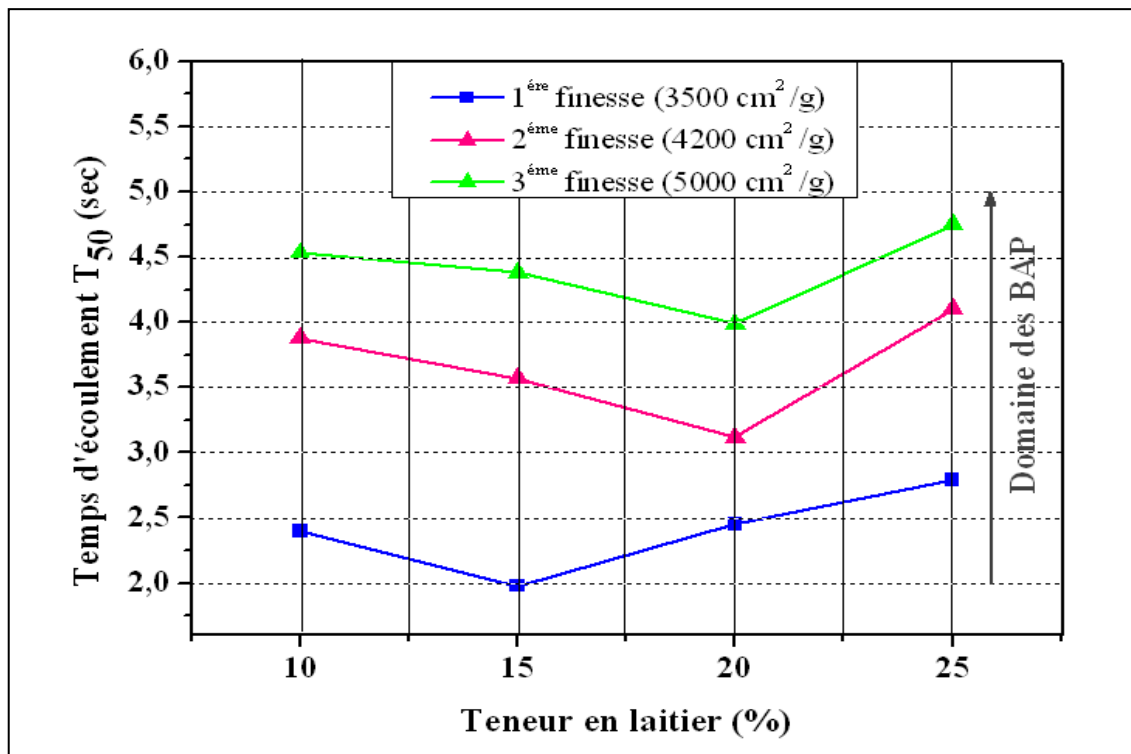


Figure 3.17 : Temps d'écoulement T_{50} en fonction de la teneur en laitier et sa finesse.

La Figure 3.17 montre la variation de temps d'écoulement T_{50} en fonction de la teneur en laitier et sa finesse. Nous remarquons ici que nos valeurs sont conformes à la recommandation d'EFNARC [6], où 15% de laitier donne le temps d'écoulement T_{50} le plus bas pour une finesse de $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$. Par contre, pour les deux autres finesses la valeur de T_{50} minimal est enregistrée pour un taux de substitution égale à 20%. Dans les taux élevés, le temps d'écoulement augmente sensiblement, en raison de l'instabilité du béton lors de l'écoulement.

La finesse et la quantité des ajouts jouent un rôle important sur l'écoulement de BAP. Vejmelkov et al. [65] ont comparé l'écoulement des BAP contenant le métakaolin et laitier de finesse différents ($9740 \text{ cm}^2/\text{g}$ et $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, respectivement). Le mélange de BAP-M présente un plus petit diamètre d'étalement et plus de temps d'écoulement par rapport à BAP-L. La perte de fluidité avec le temps était marquée pour BAP-M beaucoup plus rapide que pour BAP-L. Ceci est lié à la plus grande surface spécifique du métakaolin et sa réactivité plus élevée. Les résultats sont en accord qualitatif avec les travaux de Guneyisi et al. [91] qui ont rapportée que les ciments contenant du métakaolin à finesse élevée provoque une chute progressive du diamètre d'étalement et augmente le temps d'écoulement avec l'augmentation de la quantité du métakaolin du mélange.

3.4.2 Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)

Les résultats de temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction de la teneur en laitier et sa finesse sont rapportés sur la Figure 3.18. Cet essai nous enseigne sur la stabilité du béton lors de l'écoulement et la viscosité du mélange étudié.

Les valeurs de temps d'écoulement pour les mélanges des bétons confectionnés avec les deux types de finesse du laitier 4200 et $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ne sont pas acceptables pour l'étendue des applications et pour différentes classes de viscosité puisque sont très élevées. Manai [74] suggère des valeurs inférieure à 6 s pour pouvoir qualifier le béton d'autoplaçant (inférieure à 12s proposé par d'EFNARC [6]). Ce comportement est dû à l'augmentation de la cohésion du mélange résultante de l'augmentation de la finesse, ce qui rend la capacité du passage à travers l'orifice du V-Funnel plus difficile, puisque l'augmentation de la cohésion provoque le blocage du mélange au niveau bas du V-Funnel. On note aussi que le pourcentage de 20% pour les finesses de 4200 et $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ présente une faible

diminution du temps d'écoulement de l'ordre de 14% et 33% par rapport à la finesse de $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$, respectivement.

D'autre part, on observe un amoncellement des granulats au goulot de l'entonnoir qui signifie la présence de l'instabilité du béton lors de l'écoulement (ségrégation dynamique). Moins le béton est stable, plus l'écoulement est perturbé par les collisions intergranulaires et plus la durée de l'écoulement est longue [87]. En plus, l'augmentation de la quantité de laitier rend le mélange trop visqueux, et par conséquent le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important. Donc la quantité d'eau qui correspond au rapport $E/C = 0,40$, et le dosage de superplastifiant qui est de 1,8% sont insuffisant pour assurer le bon écoulement du béton dans l'entonnoir en V pour les finesesses de 4200 et $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$. En revanche, une finesse de laitier de $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ et un taux de substitution de laitier de 15% donne un mélange stable.

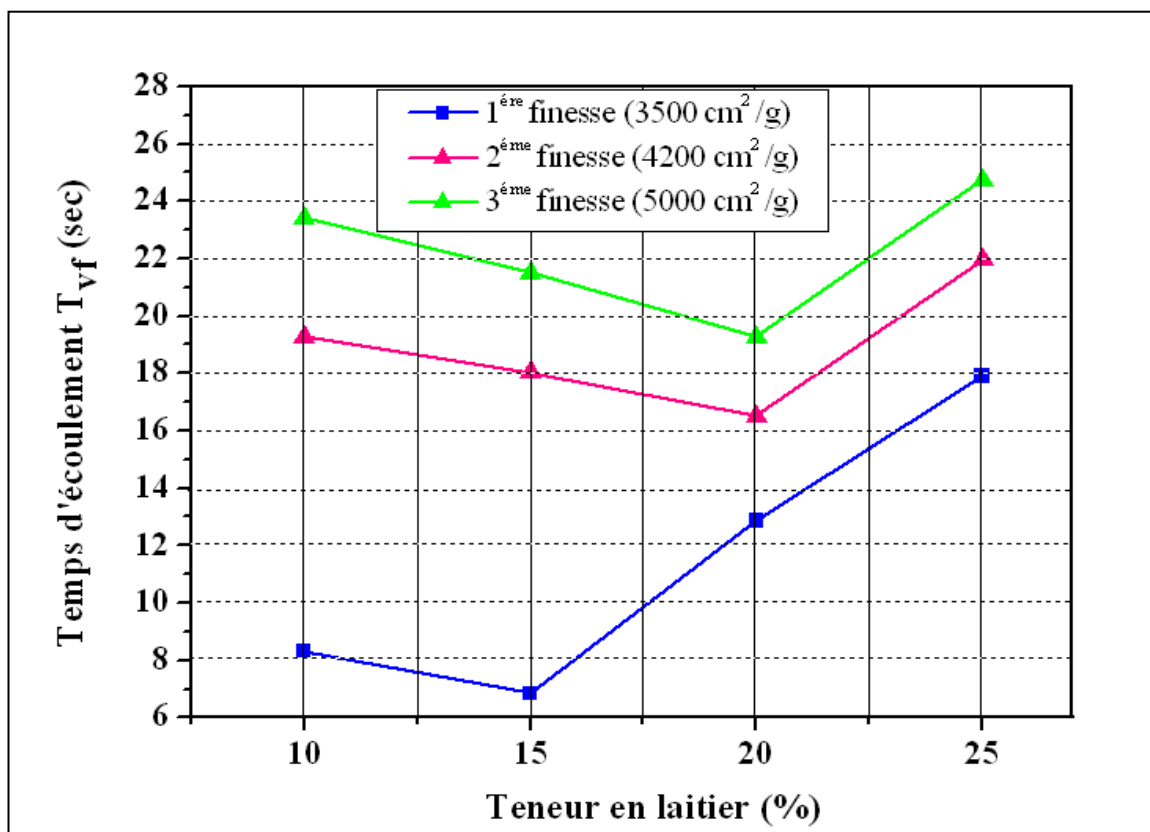


Figure 3.18 : Temps d'écoulement à l'entonnoir en V en fonction de la teneur en laitier et sa finesse.

Dans les travaux de Gesoglu et al. [79] avec des mélanges de BAP contenant environ 20, 40, 60% de laitier (SSB : $4180 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/C = 0,44$), ils ont pu avoir le temps d'écoulement à l'entonnoir en V à 10,4, 6 et 4 secondes, respectivement. En effet, Bajou et al. [88] ont montré aussi que l'incorporation d'une addition ultrafine de cendres volantes de surface spécifique $740 \text{ m}^2/\text{kg}$, améliorait la fluidité et réduisait le besoin en eau du mélange à consistance normale.

3.4.3 Mesures du rapport H_2/H_1 , les temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de l'essai de la Boîte en L (L-Box)

(a) Mesure le rapport H_2/H_1

La Figure 3.19 présente la variation de taux de remplissage des différentes compositions de BAP en fonction du teneur en laitier et sa finesse. Nous constatons clairement à partir de cette Figure que, pour toutes les formulations étudiées, le taux de remplissage présente des valeurs croissantes avec la teneur en laitier. La comparaison entre l'allure de BAP de la finesse 4200 et $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$, nous permet de montrer que l'augmentation du taux de remplissage est presque monotone malgré cette augmentation elle n'a pas satisfait la limite inférieure recommandée par EFNARC [6] ($h_2/h_1 > 0,8$). La diminution du taux de remplissage pour les mélanges préparés par une finesse de $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$ par rapport à une finesse de $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ est de l'ordre de 55, 47, 43 et 28% pour BAP 2, BAP 3, BAP 4 et BAP 5, respectivement. Pour une finesse de $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$, le pourcentage de diminution est de l'ordre de 66, 62, 52 et 33%, respectivement. Ces résultats peuvent être interprétés par l'augmentation de la cohésion de mélange due à effet d'augmentation de la finesse du laitier sur le besoin d'eau.

Ces résultats permettent de confirmer aussi que la mobilité de tous les mélanges en milieu confiné et sa mise en place ont été contrariée par des phénomènes de blocage dû à l'amoncellement des granulats au niveau de la grille.

Nehdi et al. [57] ont montré que les mélanges binaires et ternaires préparé par les cendres volantes, fumée de silice et le laitier de haut fourneau de finesse $4680 \text{ cm}^2/\text{g}$ donnent une bonne capacité aux mélanges de circuler à travers les armatures de la boîte de L-box. Les résultats de l'essai allaient entre 0,80 et 0,86 et il n'y avait pas de blocage lors d'écoulement pour tous les mélanges. Le dosage en superplastifiant dépend à la fois de

l'origine et de la finesse des additions calcaires. Pour les fillers utilisés, la plage de dosage en superplastifiant obtenue sur la base de l'essai L-Box requise pour satisfaire le caractère autoplaçant du béton est d'autant plus étendue que la surface de Blaine des additions calcaires est élevée [92].

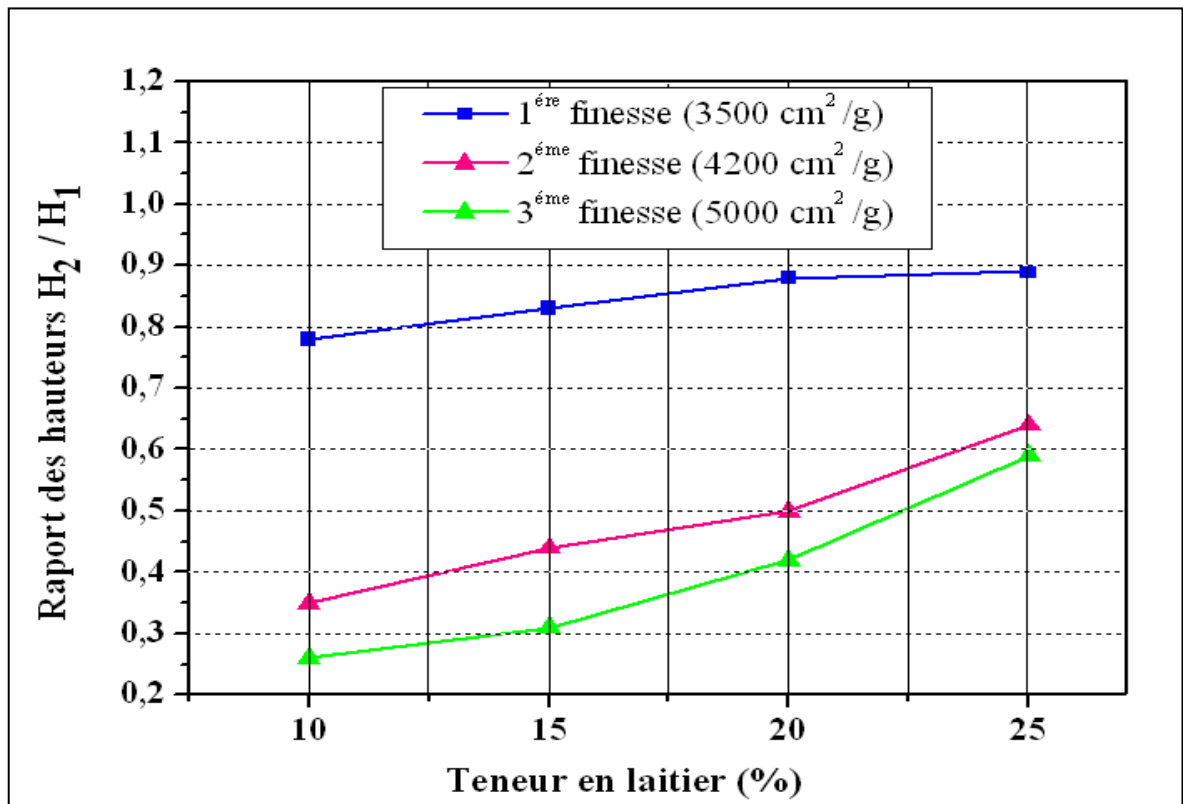


Figure 3.19 : Rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en laitier et sa finesse.

Gesoglu et al. [79] ont trouvé que les mélanges binaires n'ont pas satisfait le plus bas rapport (h_2/h_1) de 0,8 recommandé par EFNARC [6]. Dans l'exécution de l'essai du L-box, les auteurs n'ont pas observé de blocage ou de ségrégation, donc la raison de la faible valeur de h_2/h_1 pourrait être encore le manque de cohésion de ces mélanges. Cependant, tous les bétons fabriqués avec des mélanges ternaires et quaternaires de matériaux cimentaires supplémentaires (cendres volantes, fumée de silice, et le laitier de haut fourneau) ont eu des rapports de 0,82 à 0,93 qui respectant les limitations d'EFNARC [6]. Par conséquent, la combinaison des additions minérales dans les mélanges ternaires et quaternaires améliorent la capacité de remplissage et de passage du BAP.

(b) Mesure le temps d'écoulement T_{20} , T_{40}

La variation des temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de la boîte en L en fonction de la teneur en laitier et sa finesse est présentée sur les Figures 3.20 et 3.21, respectivement.

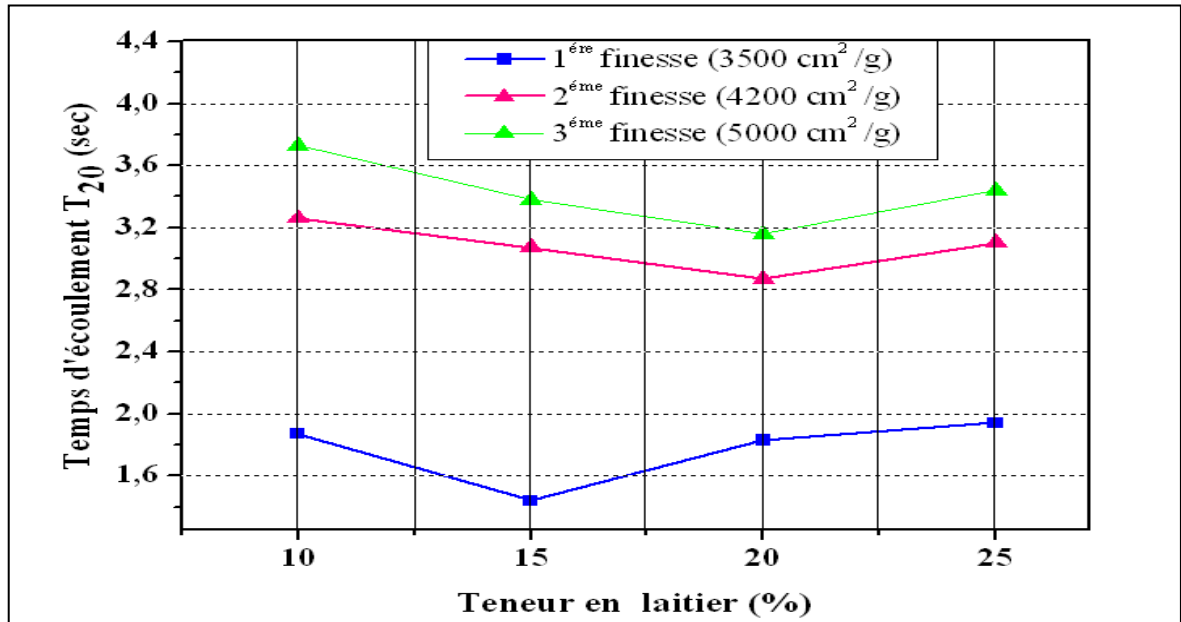


Figure 3.20 : Temps d'écoulement T_{20} en fonction de la teneur en laitier et sa finesse.

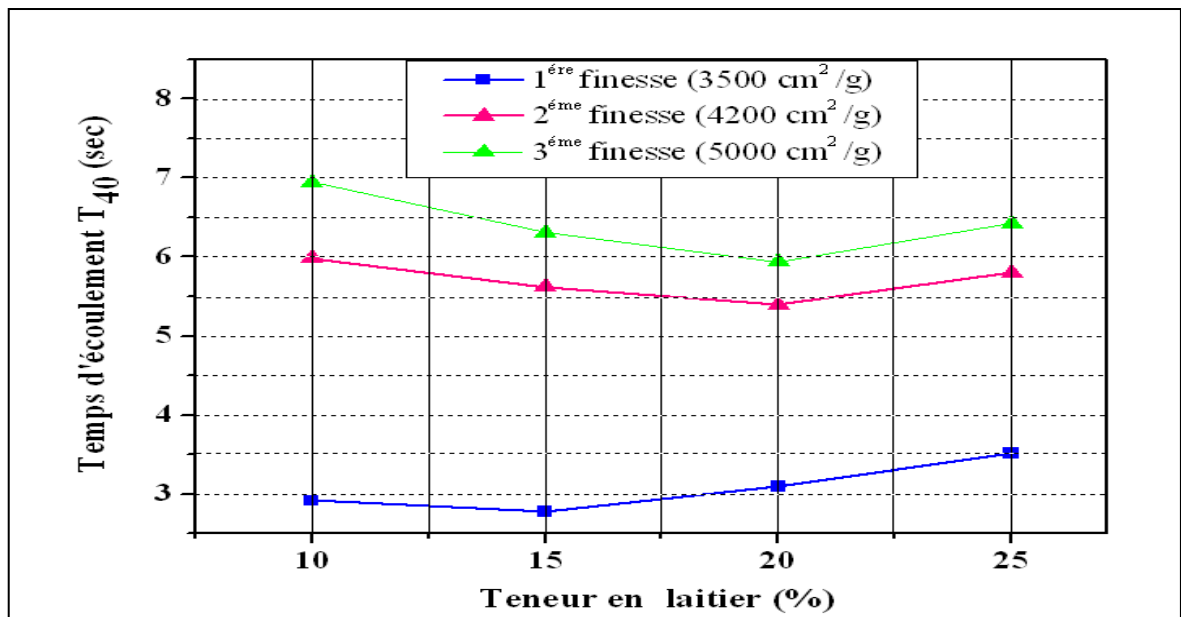


Figure 3.21 : Temps d'écoulement T_{40} en fonction de la teneur en laitier et sa finesse.

L'examen des Figures 3.20 et 3.21 révèle que pour tous les bétons étudiés, les temps d'écoulement T_{20} et T_{40} diminuent avec l'augmentation de la teneur en laitier. Les T_{20} et T_{40} diminuent et semblent atteindre une valeur minimale pour un taux de substitution de 15 et 20% correspondant aux finesses 3500, 4200 et 5000 cm^2/g , respectivement. A des taux élevés, un accroissement du temps est noté indépendamment de la finesse du laitier. Cette augmentation du temps d'écoulement s'explique par la ségrégation qui peut être caractérisée par le blocage des gros granulats derrière les barres d'aciers.

D'après ces courbes, nous pouvons constater aussi que les temps T_{20} et T_{40} sont plus ou moins proches pour les finesses 4200 et 5000 cm^2/g . Néanmoins, les formulations des BAP de finesse 3500 cm^2/g présentent un temps d'écoulement inférieur par rapports à celles des BAP de finesse 4200 et 5000 cm^2/g qui n'ont pas satisfait les limites recommandé par certains auteurs afin de rester dans un domaine autoplaçant [73] (T_{20} inférieures à 1,5 s et T_{40} inférieures à 3,5 s). Ce résultat peut être expliqué par l'augmentation de la viscosité du mélange résultant de l'augmentation de la finesse qui fait augmenter la demande en eau.

Ce résultat confirme aussi la fiabilité des paramètres utilisés pour la formulation d'un BAP, donc le temps d'écoulement est étroitement lié à la quantité et la finesse de l'ajout.

3.4.4 Mesures d'étalement, temps T_{50J} et différence de hauteur B_J au cône d'Abrams en présence du J-Ring

(a) Mesure d'étalement

La Figure 3.22 montre une comparaison de la variation de l'étalement sans et avec le J-Ring en utilisant les trois finesses (3500, 4200 et 5000 cm^2/g) de laitier, respectivement.

Pour les deux finesses 4200 et 5000 cm^2/g , on remarque une différence de valeurs d'étalement entre le cas d'absence et de présence du J- Ring sensiblement élevée par rapport aux autres formulations à base de finesse 3500 cm^2/g . La différence d'étalement est supérieure à 94 mm, ce qui est en mauvais accord de la valeur de 50 mm suggérée par EFNARC [6]. On a observé aussi une ségrégation qui est présente et visible par le blocage des gros granulats à l'intérieur de l'anneau. Ces résultats peuvent être dus à la finesse élevée de laitier (4200 et 5000 cm^2/g) utilisée qui accélère les réactions d'hydratation au

jeune âge. Au début de l'hydratation du ciment, les particules fines du laitier enveloppent uniformément la surface des particules de ciment, et comme le laitier est plus fin, l'effet de la demande en eau pour mouillage des particules devient important. Ces effets ont une influence sensible sur l'écoulement de BAP dans un milieu confiné.

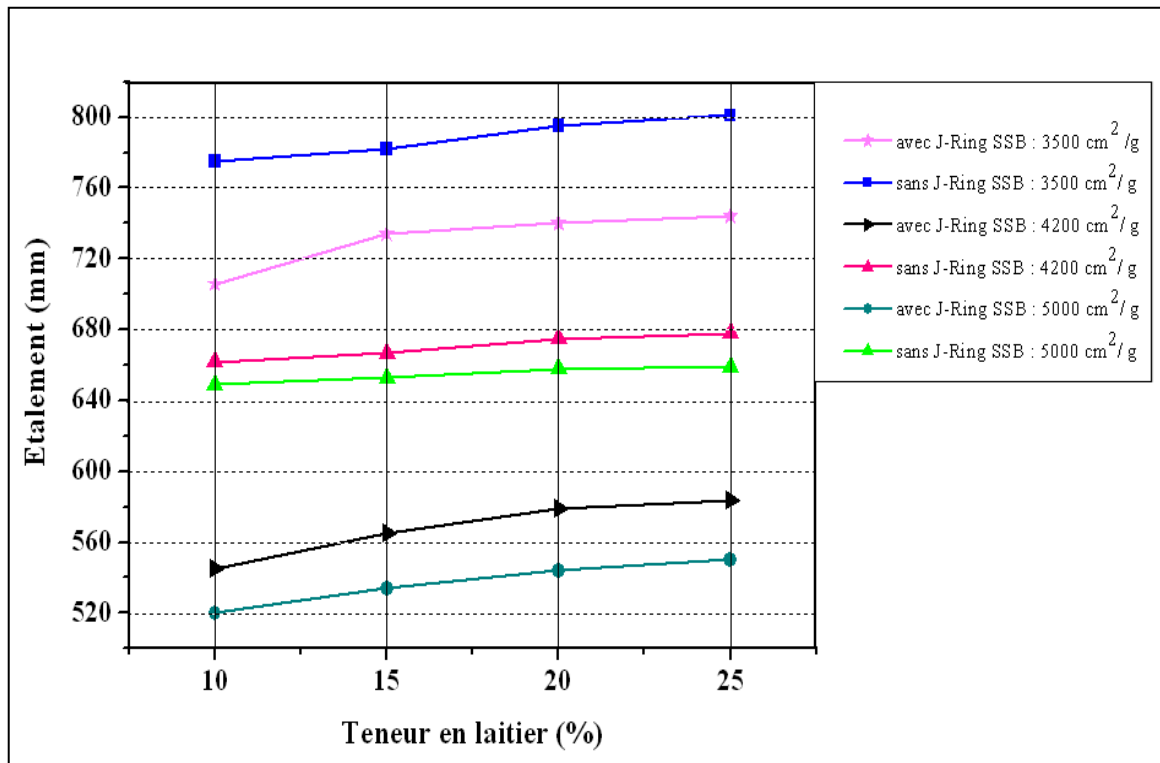


Figure 3.22 : Etalement avec et sans J-Ring en fonction de la teneur en laitier et sa finesse (3500, 4200, 5000 cm²/g).

(b) Mesure le temps d'écoulement T_{50}

Les résultats du temps d'écoulement T_{50} avec et sans le J-Ring en fonction du pourcentage du laitier, aux différents finesses sont présentés sur la Figure 3.23.

On note que la différence de temps d'écoulement avec et sans le J-Ring, sont presque similaires. Ce temps est minime dans le cas de la teneur optimale en laitier est de 15% ou 20% correspondant aux différentes finesses de laitier. On constate aussi que l'augmentation de la finesse augmente la valeur de T_{50j} . Ceci est dû à l'effet de l'augmentation de la cohésion causée par l'augmentation de la finesse du laitier qui influe d'une manière significatif sur le dosage d'eau nécessaire.

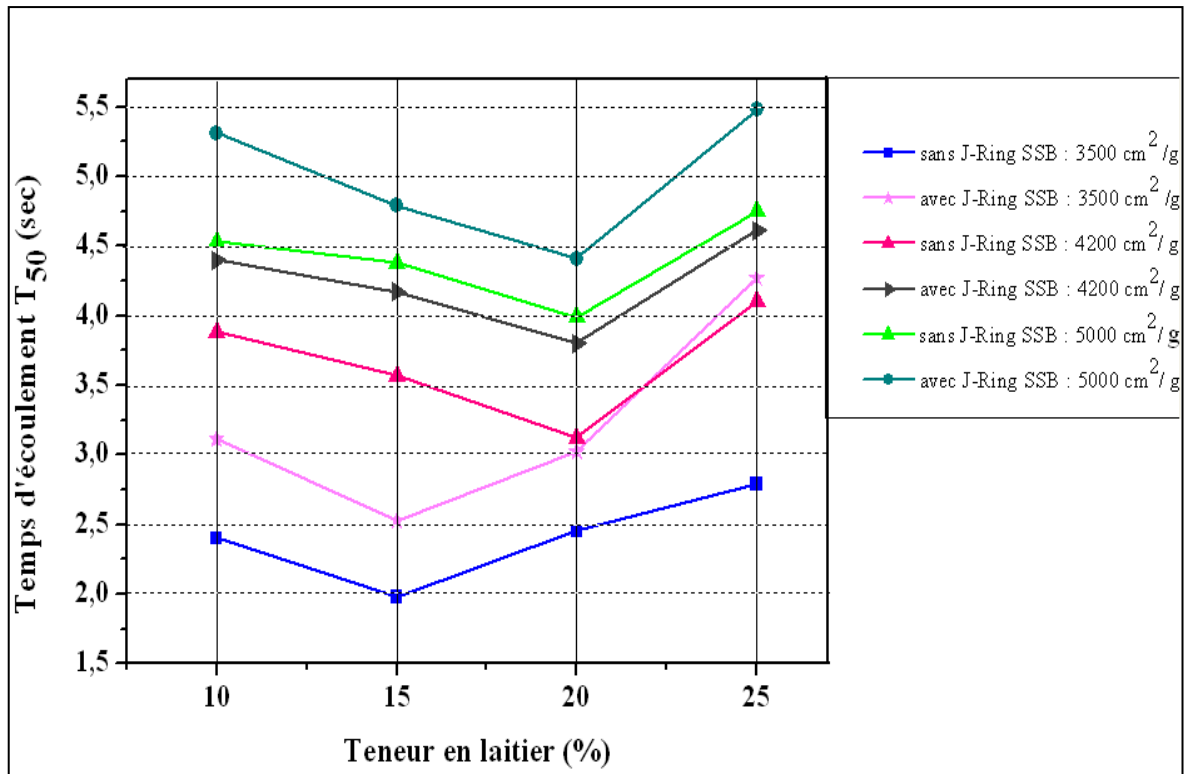


Figure 3.23 : T₅₀ avec et sans J-Ring T_{50j} en fonction de la teneur en laitier et sa finesse (3500, 4200, 5000 cm²/g).

(c) Mesure de la différence d’hauteurs au cône d’Abrams

La Figure 3.24 présente l’effet de la variation de la teneur en laitier et sa finesse sur la différence d’hauteur en présence du J-Ring. On note que la différence d’hauteur diminue avec l’augmentation de la quantité de laitier jusqu’à 15% dans le mélange préparé pour une finesse de 3500 cm²/g. Par contre, pour les mélanges préparés avec les finesses 4200 et 5000 cm²/g, cette diminution continue jusqu’à 20%. Au-delà du taux de 20% de laitier une augmentation de B_j quelque soit la finesse des mélanges est observée.

Nous pouvons voir également que la différence d’hauteur des bétons est liée aussi à la finesse du laitier, plus la finesse est élevée, plus la différence d’hauteur est importante. Par exemple, la différence d’hauteurs est enregistrée de l’ordre de 14,2 et 28,7 pour le béton BAP 5, respectivement dans le cas de finesse 4200 et 5000 cm²/g par rapport aux bétons préparé par une finesse de 3500 cm²/g. Ce comportement est dû à l’augmentation de la viscosité en raison de l’augmentation de la teneur en laitier et sa finesse agissant d’une manière significatif sur le besoin en eau.

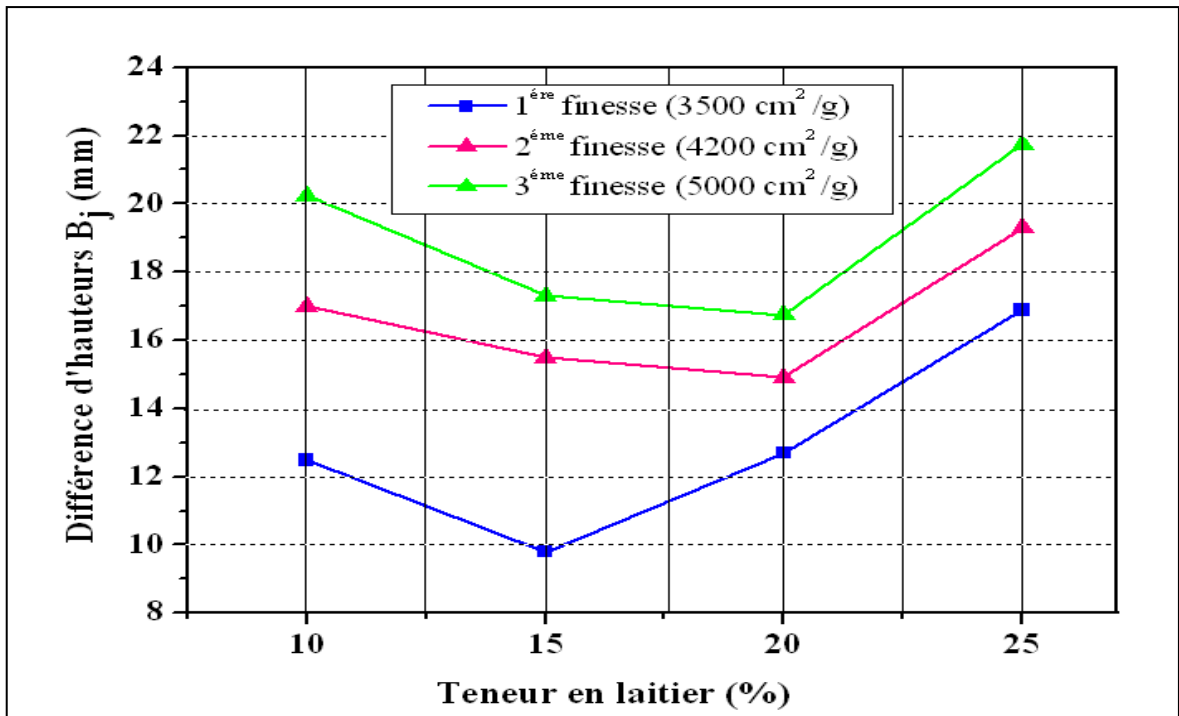


Figure 3.24 : Différence de hauteurs B_j en fonction de la teneur en laitier et sa finesse.

A l'exception, de la mélange préparé par 15% de laitier et de finesse $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$, tous les autres mélanges présentent une différence de hauteur supérieure à $12,5 \text{ mm}$. Ceci peut être expliqué par la présence de ségrégation dans les mélanges qui affaiblit la capacité d'écoulement du béton à travers les armateurs ($12,5 \text{ mm} < B_j < 21,75 \text{ mm}$).

Liu [60] a montré que l'augmentation de la différence d'hauteur dépend de la viscosité de mélange. Dans ces travaux, il a substitué le ciment par les cendres volantes jusqu'à 100%. Il a trouvé que la différence de hauteur augmente de 11 mm (F0) à 22 mm (F-100), la différence devrait résulter de la différence entre les mélanges. Le mélange F-100 a un rapport plus élevé de E/L et un dosage inférieur de superplastifiant que F0. L'influence combinée d'une augmentation de contenu de cendres volantes et de rapport de E/L et d'une diminution du dosage de superplastifiant mènent à augmenter la viscosité et par conséquent la différence de hauteur à augmenter.

Les résultats trouvés par El Hilali et al. [92] indiquent que toutes les compositions des BAP ont de bonnes capacités d'écoulement à travers les barres d'aciers ($1,5 \text{ cm} < H_i - H_e < 3,6 \text{ cm}$). L'étalement du BAP en milieu ferrailé n'est pas affecté par la finesse des fillers et

diminue de façon significative en augmentant le dosage en superplastifiant ce qui est à un point de saturation en adjuvant.

3.4.5 Mesure de la hauteur de remplissage à la boîte en U (U-Box)

La variation de la hauteur de remplissage à la boîte en U en fonction de la teneur en laitier et de sa finesse est donnée sur la Figure 3.25.

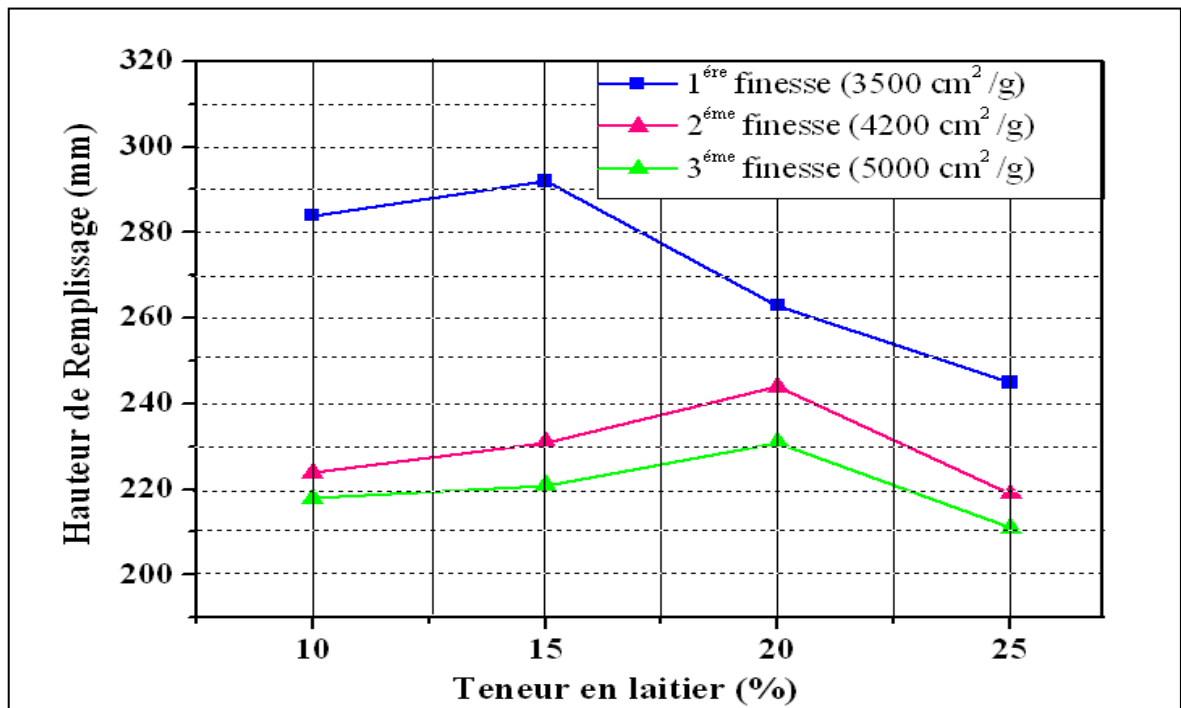


Figure 3.25 : Hauteur de remplissage à la boîte en U en fonction de la teneur en laitier et sa finesse.

On constate que les hauteurs de remplissage des mélanges préparés avec une finesse de 3500 cm²/g sont sensiblement supérieures à celles des BAP préparés avec une finesse de 4200 et 5000 cm²/g (la différence est comprise entre 34 et 40 mm). L'augmentation de la surface spécifique de 3500 cm²/g à 5000 cm²/g a diminué la hauteur de remplissage au-delà de la fourchette acceptable pour un BAP recommandé par AFNARC [6]. Les taux de diminution de la hauteur de remplissage des BAP de finesse 4200 cm²/g par rapport aux BAP de finesse 3500 cm²/g sont de 21,1, 20,9, 7,2, 10,6%, et de 76,7, 24,3, 12,1, 13,9% pour le cas de la finesse 5000 cm²/g et ce pour les taux de laitier de 10%, 15%, 20% et 25%, respectivement.

Il est possible que cette différence de hauteur de remplissage soit associée à la finesse de laitier finement broyé qui consiste à demander plus de quantité d'eau. Ce manque fait diminuer la maniabilité du béton et par conséquent provoque une ségrégation du béton, s'ensuit un encombrement des gros granulats autour des armatures, ce qui conduit à une obstruction de l'écoulement du béton et diminution de la hauteur de remplissage.

3.4.6 Mesure de résistance à la ségrégation par tamisage

Figure 3.26 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.

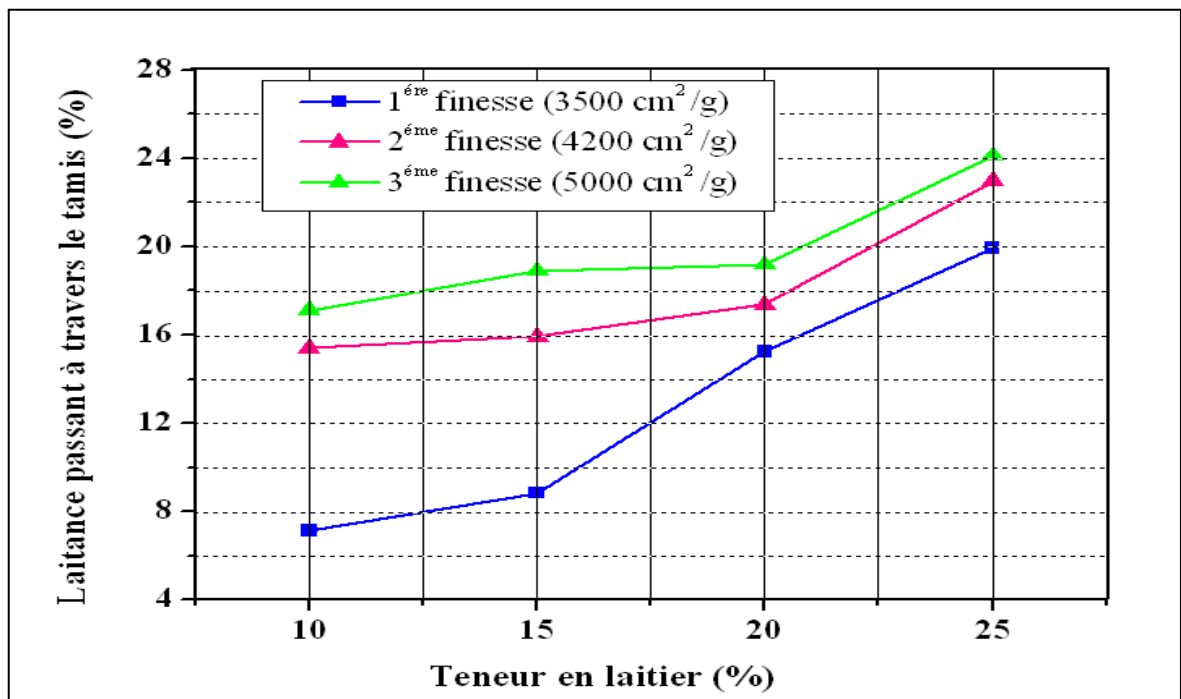


Figure 3.26 : Résistance à la ségrégation au tamis en fonction de la teneur en laitier et sa finesse.

L'allure de la variation de la résistance à la ségrégation pour tous les bétons étudiés est différente. Cependant, la résistance à la ségrégation au tamis pour tous les BAP étudiés est beaucoup influencée par l'augmentation de la finesse de laitier, en particulier après un taux de substitution de 20%. Entre les mélanges préparé avec une finesse 4200 cm²/g et

celle du BAP de finesse 5000 cm²/g, la différence dans la résistance à la ségrégation n'est pas très significative.

El Hilali et al. [92] ont montré qu'il n'existe aucune corrélation entre la surface de Blaine et la stabilité de BAP car les résultats des essais de stabilité au tamis ont montré que toutes les compositions testées ont une stabilité satisfaisante ($0 \leq \Pi \leq 15\%$). Cette stabilité diminue en augmentant le dosage en superplastifiant.

3.5 Conclusion

Les résultats de l'étude expérimentale nous a permis de prouver qu'il est possible de fabriquer des BAP avec des matériaux locaux par la méthode Okamura qui peut être modifiée pour formuler un BAP.

La substitution du ciment par du laitier Algérien a modifié la performance du BAP à l'état frais et un taux de substitution d'environ 15% semble optimal pour une finesse égale à 3500 cm²/g. L'augmentation de la finesse est possible mais nécessiterait l'augmentation du dosage en superplastifiant ou plus grandes quantités d'eau.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le travail réalisé dans cette partie vise à contribuer à mieux connaître d'une part, les effets de substitution du ciment par le laitier et, d'autre part, la surface spécifique du laitier préparé sur le comportement de béton autoplaçant à l'état frais.

Les principales conclusions que nous pouvons tirer sont les suivantes :

- L'utilisation de la méthode Okamura pouvait être utilisée avec les matériaux locaux avec quelques modifications.
- En utilisant le superplastifiant à base de polycarboxylates qui fonctionnent par répulsion stérique, le pourcentage optimal Sp/L à utiliser dans les mélanges de béton est de 1,8%.
- le laitier est un ajout minéral très intéressant du point de vue de certaines propriétés du BAP à l'état frais, sa présence améliorer l'ouvrabilité du BAP, ce qui induit une augmentation du diamètre de la galette du béton et diminution aux temps d'écoulement T_{50} et T_{V-F} . Autrement dit, les paramètres rhéologiques sont inversement proportionnels à l'étalement des BAP.
- Du point de vue ouvrabilité et rhéologie, pour une finesse égale à $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ et un taux de substitution de 15% permet donner un bon béton autoplaçant sans ressuage ni ségrégation.
- La finesse de laitier joue un rôle prédominant dans le comportement rhéologique de BAP. Autrement dit l'effet de la finesse diminue une fois la surface spécifique du laitier dépasse celle du ciment.
- A une finesse de laitier de $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$ et $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$, l'étalement de BAP est la seule propriété qui vérifie et ont des valeurs d'étalement situées à l'intérieur de la fourchette des BAP, et exactement de classe SF2, SF1 pour les finesses 4200 et $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ respectivement.
- Du point de vue ouvrabilité, une teneur en laitier à 20% et pour les deux finesses 4200 et $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ peut donner des effets positifs que les autres taux de substitutions malgré n'ont pas satisfait les recommandations européennes.

- Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique sont inversement proportionnels à la finesse de laitier, quand la finesse augmente les propriétés rhéologiques des BAP diminuent et inversement.
- Les mélanges de BAP formulé par le laitier de finesse 4200 et 5000 cm^2/g nécessite l'ajout de plus d'eau ou de superplastifiant pour atteindre les propriétés essentielles (la capacité au remplissage, la capacité de passage, la résistance à la ségrégation, rhéologie) pour les mélanges de BAP.
- Du point de vue économique, on peut économiser une quantité de ciment et la remplacer par le laitier qui coûte moins cher que le ciment et qui a un grand rôle dans l'amélioration des performances de BAP. Mais, il faut prendre en considération la finesse et l'optimisation de taux du laitier à remplacer.

Le béton autoplaçant est en plein essor, il faut néanmoins continuer les recherches et les essais sur le matériau pour faciliter la réalisation et, par la même occasion, la mise en place pour que le BAP devient le nouveau « béton ordinaire » sur les chantiers. Il sera nécessaire, de compléter cette étude par d'autres travaux :

- Essayer de trouver le dosage de superplastifiant ou la quantité d'eau pour avoir un béton autoplaçant avec des finesses 4200 et 5000 cm^2/g .
- Rechercher pour les deux finesses 4200 et 5000 cm^2/g quelle est le dosage de superplastifiant pour avoir un béton autoplaçant avec un taux de substitution de ciment par le laitier égale 15%.
- Elargir l'étude du BAP à l'état durci à la détermination d'autres caractéristiques telles que, le module d'élasticité, le retrait et le fluage.
- Réaliser des essais de durabilité (perméabilité aux gaz, eau et aux ions chlore) à long terme et le comportement du BAP en milieu agressive (eaux de mer).

RÉFÉRENCES

- [1] Khayat K., 1999, 'Les Bétons Autonivelants, Les Bétons : Bases et données pour leur Formulation', Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, sous la direction de J. Baron et J-P. Ollivier, Troisième ed, Eyrolles, Paris.
- [2] Okamura H., and Ouchi M., 2003, 'Self compacting concrete', Journal of advanced Concrete Technology, vol. 1, n°1, pp. 5-15.
- [3] François Cussigh., 2007, 'Bétons autoplaçants (BAP)', Doc. C2217 technique d'ingénieur.
- [4] Boukendakdji O., Journée d'étude sur les matériaux et les structures (Le Béton Autoplaçant : une Solution pour le Compactage du béton).
- [5] NF EN 197-1 Ciments – partie 1. Composition, spécifications et critères de conformité des ciments.
- [6] EFNARC, 2005, 'The European guidelines for Self -Compacting Concrete ', The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. WWW.efnarc.org.
- [7] Behim M., Ali Boucette T., 2009, 'Effet des additions micronisées sur l'écoulement des Bétons autoplaçants (laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre)', SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria), pp. 423- 430.
- [8] Boukendakdji O., Kenai S., Kadri E.H., Rouis F., 2009, 'Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete', Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 2593-2598.
- [9] Toutou Z., 2002, 'Rhéologie et formulation des géo-suspensions concentrées : évaluation des conditions d'extrudabilité', Thèse de Doctorat de INSA- Rennes,

- pp. 221.
- [10] Norme française, P18 – 303. Eau de gâchage pour béton. AFNOR, Paris, 1999.
- [11] Neville M., 2000, 'propriétés des bétons ', quatrième traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, Eyrolles, Paris.
- [12] ERCE – CTC est- GRANITEX, 2004, 'Les adjuvants : définitions et opportunités d'utilisation', Journée d'information (ciment, béton, adjuvants).
- [13] Rissel Khelifa M., 2009, 'Effet de l'attaque sulfate externe sur la durabilité des BAP', Thèse de Doctorat, Université de Constantine Algérie.
- [14] Sedran T., 1999, 'Rhéologie et Rhéomètre des bétons. Application aux BAP', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [15] Turcry P., 2004, 'Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation ', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [16] Persson B., 2003, 'Sulphate resistance of self-compacting concrete', Cement and Concrete Research, vol.33, pp.1933-1938.
- [17] Sedran T., De larrard F., Angot D., 1994, 'Prévision de la Compacité des Mélanges Granulaires par le Modèle de Suspension Solide', Fondements théoriques et étalonnage du modèle, Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -194, Réf. 3862.
- [18] Association Française de Génie Civil (AFGC), 2002, 'Bétons Autoplaçants - Recommandations provisoires', Annales du bâtiment et des travaux publics.
- [19] Bensebti S., 2008, 'Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux', Thèse de Doctorat, Université Mentouri –Constantine. Algérie.
- [20] Okamura H., and Ozawa K., 1995, 'Self-Compacting high Performance Concrete in Japan', Second CANMET/ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas, ACI, SP 159-2, pp 31- 44.
- [21] Kenai S., 2010, 'Cours de technologie du béton première année Magister', Université Saad Dahlab Blida.

-
- [22] Chouinard B., 1999, 'Étude des relations entre la rhéologie du béton et sa pompabilité, Mémoire pour l'obtention du grade de maitre de science (MSC)', Département de Génie Civil, Université Laval.
- [23] Khayat K., 2002, 'Cours de technologie avancée du béton', Université de Sherbrooke, Sherbrooke, pp.305.
- [24] Verrette J.L., 1989, 'Hydraulique des conduites', notes de cours, Département de Génie Civil, Université Laval.
- [25] De Larrard F., 1999, 'Structures granulaires et formulation des bétons', Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées.
- [26] Chapdelaine F., 1998, 'Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais' Mémoire pour l'obtention du grade de maitre de science (MSC)', Université Laval.
- [27] De Larrard., 1998, 'Fresh Concrete: A Hershel- Bulkley Material', Materials and Structures, vol 31, pp 494- 498.
- [28] Jean Yves Petit., 2005, ' Effet de la température, des superplastifiants et des ajouts sur les variations rhéologiques des micromortiers et bétons auto-compactants', Thèse de Doctorat, Faculté de Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- [29] Khayat K., 2000, 'Optimization and Performance of Air-Entrained, Self-consolidating Concrete', ACI Materials Journal, vol. 97, p. 526-535.
- [30] Mechaymech A., 2005, 'Optimisation et performance de bétons autoplaçants économiques à base de différentes combinaisons d'adjuvants et de liants composés', Mémoire pour l'obtention du grade de maître de science, Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- [31] Hu C., De larrard F., Gjorv O. E., 1995, 'Rheological testing and modeling of fresh high-performance concrete', Materials and structures, vol.28, pp.1-7.
- [32] Park N., 2005, 'Rheological properties of cementitious materials containing

- mineral admixtures’, *Cement and Concrete Research*, vol 35, pp 842-849.
- [33] Desprez C., Mozelman M., 2003, ‘Propriétés et caractérisation des bétons autoplaçants’, projet de fin d’étude, Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- [34] Boukendakdji O., 2010, ‘Etude de l’influence des paramètres de formulation sur les propriétés d’un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires’, Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie.
- [35] Abib Z., 2004, ‘Formulation et Caractérisation des Bétons Autoplaçant’, Mémoire de Magister, Université des Science et de la Technologie Houari Boumediene Algérie.
- [36] Assie S., Escadeillas G., Waller V., 2007, ‘Estimates of self-compacting concrete potential durability’, *Construction and Building Materials.*, vol. 21, pp.1909-1917.
- [37] Rozière E., Granger S., Turcry P., Loukili A., 2007, ‘Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete’, *Cement & Concrete Composites.*, vol. 29, pp. 626-636.
- [38] Rouis F., 2007, ‘Formulation et Propriétés Mécaniques des Bétons Autoplaçants à Base de Laitier de Haut Fourneau’, Mémoire de Magister, Centre universitaire Yahia Farès de Médéa.
- [39] Oner M., Erdogdu K., Gunlu A., 2003, ‘Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement’, *Cement and Concrete Research.*, vol. 33, pp. 463 - 469.
- [40] Parra C., Valcuende M., Gómez F., 2011, ‘Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete’, *Construction and Building Materials.* vol. 25, N° 1, pp 201-207.
- [41] Khatib JM., Hibbert JJ., 2005, ‘Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin’, *Construction and Building Materials*, vol.19, pp 460-472.

-
- [42] Ilker B.T., et Tayfun U., 2009, 'Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC)', *Construction and Building Materials*, vol. 24, N° 7, pp 1286-1295.
- [43] Domone P.L., 2007, 'A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete', *Cement and Concrete Composites*, vol 29, pp.1-12.
- [44] Alrifai A., Aggoun S., Cabrillac R., 2008, 'Influence des Paramètres de Formulation sur le Retrait Endogène des Pâtes et des Mortiers Issus de BAP', XXVI^e Rencontres Universitaires de Génie Civil., Nancy, pp. 1-8.
- [45] Assié S., 2004, 'Durabilité Des Bétons Autoplaçants', Thèse de Doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- [46] Ayed K., Benaissa A., Vidal T., Pons G., Abidlah A., 2009, 'Etude du comportement diffère du BAP - l'influence de la pouzzolane naturelle de Beni Saf sur le retrait du béton autoplaçant', 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria), pp.283-288.
- [47] Lee K.M., Lee S.H., Kim G.Y., 2006, 'Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag ', *Cement and Concrete Research.*, vol. 36, p. 1279 – 1285.
- [48] Gram H.E., Piiparinen P., Kim G.Y., 1999, 'Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance', *Proceeding of First international RILEM Symposium on Self Compacting Concrete*, Stockholm, Sweden, pp. 211 – 225.
- [49] Turcry P., 2003, 'Le retrait plastique des bétons autoplaçants - Etude paramétrique de l'influence de la formulation', XXI^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil., Ecole Centrale de Nantes, pp. 247-256.
- [50] Guneyisi E., Gesoglu M., Ozbay E., 2010, 'Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures', *Construction and Building Materials.*, vol. 24, pp. 1878-1887.

-
- [51] Benkechkeche G., Houari H., 2009, 'Influence des paramètres de composition sur le fluage des poutrelles en béton autoplaçant', 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria), pp.51-58.
- [52] Ameer E., 2009, 'Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires', Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle.
- [53] Zhu W., Bartos P.J.M., 2003, 'Permeation properties of self-compacting concrete', Cement and Concrete Research, vol. 33, pp. 921-926.
- [54] Baron J., et Ollivier J.P., 1996, 'La Durabilité Des Bétons', Eyrolles, France.
- [55] Zhu w., Quinn J., Bartos P.J.M., 2001, 'Transport properties and durability of self-compacting concrete', Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 451-458.
- [56] Dinakar P., Babu K.G., Santhanam M., 2008, 'Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes', Cement & Concrete Composites, vol. 30, pp. 128-138.
- [57] Nehdi M., Pardhan M., Koshowski S., 2004, 'Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements', Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 2103-2112.
- [58] Guneyisi E., and Gesoglu M., 2008, 'A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag', Materials and Structures, vol. 41, pp.479-493.
- [59] Nguyen T.S., 2006, 'Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires', Thèse de Doctorat sous la direction de Pr Karim Ait-Mokhtar et Pr Nicolas Burlion, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMCD) ; INSA-UPS Génie Civil.
- [60] Liu M., 2010, 'Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel

- ash', *Construction and Building Materials*, vol.24, pp. 1245-1252.
- [61] Valcuende M., Parra C., 2010, 'Natural carbonation of self-compacting concretes', *Construction and Building Materials*, vol. 24, N° 5, pp. 848-853.
- [62] CARDE C., 1997, 'Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés due à la lixiviation des matériaux cimentaires', Thèse de Doctorat, I.N.S.A. Toulouse.
- [63] Persson B., 2003, 'Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 33 (3), pp. 373– 379.
- [64] Yazici H., 2008, 'The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete', *Construction and Building Materials* , vol. 22, pp. 456-452.
- [65] Vejmelkova E., Keppert M., Grzeszczyk S., Skalinski B., cerny R., 2011, 'Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag', *Construction and Building Materials.*, vol. 25, pp. 1325 -1331.
- [66] Efnarc, 2002, 'specification and guidelines for SCC', available on www.efnarc.org.
- [67] Fares H., Noumowe A., Remond S., 2009, 'Self-consolidating concrete subjected to high temperature -Mechanical and physicochemical properties', *Cement and Concrete Research*, vol 39, pp. 1230-1238.
- [68] Liu X., Ye G., De Schutter G., Yuan Y., Taerwe L., 2008, 'On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste', *Cement and Concrete Research*, vol 38, pp. 487-499.
- [69] Naceri A., et Messaoudene I., 2006, 'Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier', *Lebanese Science Journal*, Vol.7, N°.2, pp.85-96.
- [70] Domone P.L.J., and Jin J., 1999, 'Properties of mortar for self-compacting concrete', *Proceeding of RILEM International Symposium on self compacting concrete*, Stockholm, RILEM Proceeding PRO 7, pp.109 - 120.

-
- [71] Chabi S., 2004, 'Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers', N° 5, pp. 3-8.
- [72] De Schutter G., 2005, 'Guidelines for testing fresh self-compacting concrete', European Research project: Measurement of properties of fresh self-compacting concrete, Growth Contract No. GRD2-2000-30024, pp. 23.
- [73] Soneb M., and Bartos P.J.M., 2002, 'Filling ability and plastic settlement of self – compacting concrete' *Materials and Structures*, vol 3, pp. 462 – 469.
- [74] Menai Khaled., 1995, 'Etude de l'Effet d'Ajout Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants', Mémoire de Maîtrise des Sciences Appliquées, Spécialité : Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- [75] EN 12350-8., 2007, Testing fresh concrete – part 8: self-compacting concrete – slump-flow test.
- [76] Zhang X., Han J., 2000, 'The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste', *Cement and concrete Research*, vol. 30, pp. 827-830.
- [77] Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y., 2005, 'Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio', *Cement and concrete Research*, vol. 35, pp. 532-539.
- [78] Yung Wang H., Liang Huang W., 2010, 'Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass', *Construction and Building Materials*., vol. 24, pp. 1008-1013.
- [79] Gesoglu M., Guneyisi E., Ozbay E., 2009, '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*, vol. 23, pp. 1847-1854.
- [80] Diamantonis N., Marinos I., Katsiotis M.S., Sakellariou A., Papathanasiou A., Kaloidas V., Katsioti M., 2010, 'Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete', *Construction and*

- Building Materials, vol 24, N° 8, pp. 1518-1522.
- [81] Bethmont S., 2005, 'Mécanismes de Ségrégation dans Les Bétons Autoplaçants (BAP)', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [82] Hocine S., 2010, 'Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico- mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants', Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes.
- [83] Siddique R., 2011, 'Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash', *Materials and Design*, vol. 32, pp. 1501-1507.
- [84] Uysal M., Sumer M., 2011, 'Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures', *Construction and Building Materials*, vol 25, N° 11, pp. 4112-4120.
- [85] Uysal M., Yilmaz K., 2011, 'Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete', *Cement and Concrete Composites*, vol 33, N° 7, pp. 771-776.
- [86] Sonebi M., Grünewald S., and Walraven J., 2007, 'Filling ability and passing ability of Self-Compacting Concrete', *ACI Materials Journal*, pp. 162-170.
- [87] Bouzoubaa N., and Lachemi M., 2001, 'Self – Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash: Preliminary Results', *Cement and Concrete Research*, vol.31, pp. 413 – 420.
- [88] Felekoglu B., Türkel S., Kalyoncu H., 2009, 'Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash – Portland cement composites', *Construction and Building Materials*, vol. 23, N° 5, pp. 2053-2061.
- [89] Micah Hale W., Freyne Seamus F., Bush Jr Thomas D., Russell Bruce W., 2008, 'Properties of concrete mixtures containing slag cement and fly ash for use in transportation structures', *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 1990 - 2000.

-
- [90] Mnahoncakova E., Pavlikova M., Grzeszczyk S., Rovnanikova P., Cerny R., 2008, 'Hydric, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers', *Construction and Building Materials.*, vol. 22, pp. 1594 -1600.
- [91] Guneyisi E., Gesoglu M., Ozbay E., 2009, 'Evaluating and forecasting the initial and final setting times of self-compacting concretes containing mineral admixtures by neural network'. *Mater and Struct.*, vol. 42, pp. 469 - 484.
- [92] El hilali A., Ghorbel E., Gonnon P., 2008, 'Influence des fillers sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants'. *Revue.* vol 31, pp.1 - 8.

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 : $\rho_C=3050$ kg/m³
- Sable : $\rho_S=2560$ kg/m³
- Superplastifiant : $\rho_{Sp}=1070$ kg/m³
- Eau : $\rho_E=1000$ kg/m³

Coefficient d'absorption du sable $A_b= 1.1\%$

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

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0.40$ ou (par volume) $E/C = 1.22$

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°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 μ_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% :

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

La quantité de ciment C en kg :

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

A.3.2 Le Sable

La quantité du sable en kg est S :

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

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 E₁, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E₂ (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_{vol}

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

La quantité d'eau globale E en litre :

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

Eau1 $E_1 = E \times 0.70$

Eau2 $E_2 = E \times 0.30$

Annexe 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 $V=20$ litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
 - ❖ Masse volumique apparente du gravier : $\rho_G = 1470 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du gravier : $\rho_{AG} = 2715 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du sable : $\rho_S = 2560 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du ciment : $\rho_C = 3050 \text{ kg/m}^3$
- Les coefficients d'absorption :
 - ❖ Coefficient d'absorption du sable : $AbS = 1.1\%$
 - ❖ 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 $E/C_{\text{volume}}=1.22$ par unité de volume de ciment et $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volum}} / \rho_A = 0.4$ 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°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 :

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

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/m³)

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

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

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

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

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

L'eau contenue dans le sable : e_1

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

L'eau contenue dans le gravier : e_2

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

L'eau contenue dans le superplastifiant : e_3

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

L'eau à extraire e :

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

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

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

Avec :

Eau1 $E_1(kg) = 0.70 \times E$

Eau2 $E_2(kg) = 0.30 \times E$