

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géomatériaux et Génie Civil

THESE DE DOCTORAT D'ETAT

Spécialité : Génie Civil

**ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE
FORMULATION SUR LES PROPRIÉTÉS D'UN BÉTON
AUTOPLAÇANT :**

OPTIMISATION DES CONDITIONS OPÉRATOIRES

Par

Othmane BOUKENDAKDJI

Devant le jury composé de :

N. BOURAHLA	Professeur à l'Université de Blida	Président
A. AHMED BENYAHIA	Professeur à l'U.S.T.H.B.	Examineur
N. MOULAI-MOSTEFA	Professeur à l'Université de Médéa	Examineur
B. MENADI	M.C.A. à l'Université de Blida	Examineur
S. KENAI	Professeur à l'Université de Blida	Rapporteur
E.H. KADRI	H.D.R M.C. à l'Université Cergy-Pontoise (France)	Co-Rapporteur

Blida, 2010

RÉSUMÉ

Les bétons autoplaçants (BAP) sont connus comme étant des bétons très fluides, homogènes, qui se mettent en place sous le seul effet de la gravité. Ces bétons sont élaborés selon une formulation spécifique : fort dosage en sable et en éléments fins (filler, laitier, pouzzolane ou cendres volantes), emploi de superplastifiants et éventuellement d'un agent colloïdal qui permet d'assurer l'homogénéité du mélange. Les différentes approches visant à concevoir des bétons autoplaçants ont abouti à des formulations de bétons ayant un volume de pâte plus important que celui des bétons ordinaires pour des résistances mécaniques égales. La formulation la plus connue est celle de OKAMURA. Les BAP sont caractérisés par une fluidité importante et surtout par une diminution de la ségrégation et du ressuage. Pour obtenir ces propriétés, on ajoute de fortes teneurs en ajouts minéraux. En effet, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granularités différentes permet également d'améliorer de façon générale la compacité du béton. Les additions minérales telles que le laitier, la pouzzolane ou même les fillers sont disponibles en abondance en Algérie mais malheureusement non exploitées suffisamment comme additions aux mélanges cimentaires.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant, à travers la valorisation du laitier d'El-Hadjar. Ainsi, le laitier a été introduit aux mélanges de béton en substitution du ciment à différents pourcentages. Deux types de superplastifiants, appartenant à deux générations différentes, ont été utilisés. L'étude menée a permis en premier lieu de conclure que la méthode OKAMURA appelée aussi « Méthode Générale » pouvait être utilisée avec les matériaux locaux avec quelques modifications concernant surtout l'optimisation de la teneur en sable et en superplastifiant ainsi que la teneur en eau. Il s'agissait au début, de fixer tous les paramètres afin de pouvoir étudier l'effet du laitier sur les propriétés des BAP à l'état frais et à l'état durci.

L'étude expérimentale a montré que du point de vue ouvrabilité et rhéologie, une teneur en laitier de 20% peut donner un bon béton autoplaçant sans ressuage ni ségrégation, avec un optimum de 15%. Le laitier algérien a le même effet sur les mélanges de BAP quelque soit la nature du superplastifiant utilisé. À 15% de teneur en laitier, l'ouvrabilité peut être retenue jusqu'à 60 minutes en utilisant le superplastifiant PC à base de polycarboxylate. Le superplastifiant PC à base de polycarboxylate est plus efficace, du point de vue ouvrabilité et rhéologie, que le superplastifiant PNS à base de Polynaphtalène Sulfonate. Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique sont inversement proportionnels à l'étalement des BAP. Les résistances mécaniques diminuent en présence du laitier, mais redeviennent comparables à celles du béton de référence à long terme, au-delà de 28 jours.

Mots clés : Béton Autoplaçant ; Ajouts minéraux ; Laitier ; Superplastifiants ; Formulation ; Ouvrabilité ; Rhéologie ; Résistance ; optimisation.

ملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا معروفة كونها عالية المرونة أو السيولة , منسجمة , وتأخذ مكانها فقط بفعل وزنها . هذا النوع من الخرسانة يحضر بطريقة خاصة : نسبة عالية من كمية الرمل والمواد العالية الرقة (مواد الحشو , فضلات الأفران , البوزولان , الدخان الطائر وغيرها) , استعمال مواد كيميائية (الملدنات الممتازة) تساعد على تماسك وليونة الخرسانة , التي تضمن تجانس الخليط . أدت مختلف الطرق المتبعة لتصميم الخرسانة المرصوصة ذاتيا إلى خلطات تكون فيها نسبة عالية من حجم العجينة الإسمنتية مقارنة مع الخرسانة العادية وهذا لنفس الجهد الميكانيكي . طريقة الخلط الأكثر شهرة هي طريقة أوكامورا(العالم الياباني المكتشف للخرسانة المرصوصة ذاتيا) . تمتاز الخرسانة المرصوصة ذاتيا بليونتها عالية وخاصة نقص في الإفرازات المائية . لكي نتحصل على هذه الخصائص , يجب على الخليط أن يحتوي على نسبة عالية من المواد المعدنية الرقيقة جدا . فعلا إن إدماج عدة مواد رقيقة ذات أبعاد مختلفة تسمح بالحصول على خرسانة مضغوطة . بعض المواد المعدنية الرقيقة مثل (فضلات الأفران , البوزولان , مواد الحشو) موجودة بكثرة في الجزائر ولكن لسوء الحظ غير مستغلة بالقدر الكافي كمادة إضافية في الخليط الإسمنتي .

هدف هذا العمل هو دراسة تأثير عوامل طريقة الإستعمال في خصائص الخرسانة المرصوصة ذاتيا , عن طريق تقييم مادة فضلات أفران مصنع الحديد والصلب بالحجار بالقرب من مدينة عنابة . إذن مادة فضلات الأفران تم إدراجها في خليط الخرسانة كبديل للإسمنت وهذا بنسب متفاوتة . تم استعمال نوعين من اللدنات الممتازة التي تسمح بليونتها الخرسانة , هذان النوعان ينتميان إلى عهدين مختلفين . سمحت هذه الدراسة بالتأكد من إمكانية استعمال طريقة أوكامورا المسماة أيضا "الطريقة العامة" لإنتاج الخرسانة المرصوصة ذاتيا مع بعض التعديلات خاصة في تحديد كمية الرمل , كمية اللدنات الممتازة و كذلك نسبة الماء في الخليط . كان من اللازم في بادئ الأمر تحديد وتجميد كل المقادير كي يتسنى لنا دراسة تأثير مادة فضلات الأفران في خصائص الخرسانة المرصوصة ذاتيا في حالتها المرنة و الصلبة .

بينت الدراسة التجريبية أنه من حيث المرونة وتحرك الخليط (ريولوجيا) فإن نسبة 20 في المئة من فضلات الأفران للإسمنت تعطينا خرسانة مرصوصة ذاتيا من النوع الجيد دون إفرازات للسوائل , والنسبة الأمتثل تعادل 15 في المئة . لمادة فضلات الأفران الجزائرية نفس التأثير مهما تكون نوعية مادة اللدنات الممتازة المساعدة على المرونة , المستعملة بنسبة 15 في المئة كبديل عن الإسمنت . يمكن الاحتفاظ بليونتها الخليط حتى 60 دقيقة بعد بداية الخلط وهذا إذا استعملت اللدنات الممتازة من نوع " بوليكاربوكسيلات" . البوليكاربوكسيلات أكثر نجاعة من مادة " بوليناقتالين سيلفونات " كمادة مساعدة على المرونة . حد القطع و كذلك اللزاجة البلاستيكية قيمتهما معاكسة لقيمة سيولة الخرسانة المرصوصة ذاتيا . تتناقص المقاومة الميكانيكية مع استعمال مادة فضلات الأفران مع الإعتدال بعد 28 يوما من بدء الخلط .

الكلمات المفاتيح : الخرسانة المرصوصة ذاتيا , المواد المعدنية المضافة , فضلات الأفران , الملدنات الممتازة المساعدة على المرونة , طريقة الإستعمال , الليونة , الريولوجيا , المقاومة .

ABSTRACT

Self-Compacting Concretes (SCC) are known to be very fluid concretes, homogeneous, that take place by the only mean of gravity. These concretes are elaborated according to a specific formulation : high dosage in sand and fine elements (fillers, slag, pouzolane or fly ashes), use of superplasticizers and eventually of a colloidal agent that permits to insure homogeneity of the mixture. Different approaches aiming to design self-compacting concretes have led to formulations of concrete having a volume paste more important than that of ordinary concrete for equal mechanical strenghts. The most known formulation is that of OKAMURA. SCC's are characterised by an important fluidity and especially a decrease of segregation and bleeding. To obtain these properties, we add high proportion of mineral additions. In fact the combination of many cementary materials having different granularities permits also the improvement of the compacity of concrete. Mineral additions such as slag, pouzolane or even fillers are available in abundance in Algeria but unfortunately non used sufficiently as additions to concrete mixtures.

The objective of this work is to study the influence of formulation parameters and the properties of a self-compacting concrete, through the use of slag from the steel factory of El-Hadjar. Thus slag has been introduced to concrete mixtures by substitution to cement at different percentages. Two types of superplaticizers belonging to two different generations, have been used. The experimental investigations concluded that OKAMURA's method called also « General Method » could be used with local materials with some modifications concerning especially dosage in sand, superplasticizer and water. Initially all parameters were fixed so that we can study the effect of slag on the properties of both fresh and hardened self-compacting concrete.

From the workability and rheological points of view, a percentage of 20% of salg gave a good SCC without bleeding nor segregation, with an optimum of 15% of substitution to cement. Algerian slag has the same effect on mixtures independantely of the nature of superplasticizer used. At 15% of slag, workability retention can reach 60 minutes using a polycarboxylate based superplasticizer (PC). Polycarboxylate based superplasticizer is more efficient, as far as workability is concerned, than a polynaphtalene sulfonate based superplasticizer. Yield stress and plastic viscosity are inversely propotional to spread of SCCs. Mechanical strenghts decreased in presence of slag, but are comparable at long terms, above 28 days of curing.

Key words : Self-Compacting Concrete ; mineral additions ; slag ; superplasticizers ; formulation ; workability ; rheology ; strength ; optimisation.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu DIEU "Allah" Miséricordieux qui m'a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.

Cette thèse est le fruit d'un long travail qui n'aurait pu arriver à terme sans l'aide de nombreuses personnes. Je tiens à ce que chacune d'elles sache que je la remercie sincèrement.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements à Monsieur KENAI Said, Professeur à l'Université Saad Dahlab de Blida, Directeur de cette thèse qui, malgré ses nombreuses responsabilités, n'a pas hésité à consacrer de son temps pour me faire bénéficier de ses orientations, ses conseils aux moments importants, et enfin à corriger minutieusement cette thèse. Professeur KENAI restera pour moi et pour toujours une référence scientifique et pédagogique de très grande qualité que je demande à encore en profiter durant le restant de ma carrière professionnelle.

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

Je souhaite ensuite remercier mes rapporteurs de thèse qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être membres de jury :

- | | |
|--------------------------------|----------------------------|
| ✓ Professeur N.BOURAHLA | Président du jury de thèse |
| ✓ Professeur A. AHMED BENYAHIA | Examineur de thèse |
| ✓ Professeur N. MOULAI-MOSTEFA | Examineur de thèse |
| ✓ Docteur B. MENADI | Examineur de thèse |

Ce travail n'a pu être réalisé que grâce à la collaboration du laboratoire de Géomatériaux du département de Génie Civil de l'Université de Blida et ceci par la mise en

disposition des moyens des essais pour les bétons autoplaçants, je l'en remercie vivement, sans oublier de remercier Monsieur Fortas Abdelkader, laborantin de ce même laboratoire.

En grande partie, ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de Génie Civil de l'université de Médéa, avec l'assistance et la participation dans la réalisation des essais de deux de nos étudiantes en Magister, Mesdames ZEMIRLINE Soulef et ROUIS Fahima, je ne saurai les remercier pour tout leur aide et soutien. Mes remerciements s'étalent aussi à Mademoiselle BOUKHELKHAL Djamilia, Ingénieur du laboratoire qui a permis le bon déroulement des expériences du début jusqu'à la fin.

Je remercie également les responsables de la Cimenterie Ain-Kebira (Setif) pour nous avoir approvisionné en laitier granulé.

Je tiens à remercier également la direction du laboratoire CETIM (Boumerdès) et tout particulièrement Mr DAOUDI et Mr BELAL, pour l'accueil et la mise en disposition du broyeur pour le laitier.

Mes vifs remerciements vont aussi à mon cher ami ABBAS TURKI Nasreddine qui m'a accueilli au sein de son entreprise et m'a permis de broyer une partie du laitier utilisé dans ce travail.

Mes sincères remerciements vont également aux responsables de la société GRANITEX, particulièrement Mr A. ABIB et Mr M. MADANI qui ont contribué à la réalisation de ce travail par la fourniture des superplastifiants.

Je ne saurai oublier de remercier vivement Professeur P. DOMONE de University College of London (Grande Bretagne) qui m'a accueilli dans son laboratoire en Mai 2005 et m'a permis d'effectuer tous les essais d'ouvrabilité du béton autoplaçant, et de mettre à ma disposition tous les recueils des trois proceedings des symposiums du béton autoplaçant organisés par RILEM.

Ma grande gratitude va au Professeur HANINI Salah pour sa précieuse correction apportée à ce manuscrit.

Enfin mes chaleureux remerciement à mes parents, ma femme et mes deux enfants pour leurs patiences et soutien moral tout au long de cette thèse.

TABLE DES MATIERES

Résumé	
Remerciements	
Table des matières	
Liste des illustrations, graphiques et tableaux	
Liste des symboles et des abréviations	
Introduction générale	19
Chapitre 1 : Le Béton Auto-Plaçant – Etude bibliographique	
1.1. Introduction	23
1.1.1. Avantages techniques	23
1.1.2. Avantages socio-économiques	24
1.2. Définitions et caractéristiques d'un BAP	24
1.3. Domaines d'Emploi des BAP	25
1.4. Mise en œuvre des BAP	26
1.4.1. Coulage	26
1.4.2. Coffrage	27
1.4.3. Vibration	27
1.4.4. Cure	28
1.4.5. Transport	28
1.5. Matériaux constituant un BAP	28
1.5.1. Le ciment	29
1.5.2. Les ajouts minéraux	30
1.5.3. Les Granulats	34
1.5.4. L'eau de gâchage	36
1.5.5. Les adjuvants	37
1.5.5.1. Les superplastifiants	37
1.5.5.2. Les agents de viscosité	40
1.6. Propriétés d'un BAP à l'état frais	41
1.6.1. Capacité au remplissage	42
1.6.2. Capacité de passage	44
1.6.3. Résistance à la ségrégation	45
1.6.4. Rhéologie des BAP	45
1.6.4.1. Définition de la rhéologie	45
1.6.4.2. Comportement rhéologique des BAP à l'état frais	47
1.6.5. Facteurs clés des propriétés des BAP à l'état frais	50
1.7. Formulations et Compositions des BAP	54
1.7.1. Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)	54
1.7.2. Formulations modifiées de la méthode générale	56
1.7.2.1. Kochi University of Technology (Japon)	56
1.7.2.2. University of Tokyo (Japon)	56

1.7.2.3.	Delft University (Denmark)	56
1.7.2.4.	Méthode de Domone (U.C.L. Grande Bretagne)	57
1.7.3.	Formulation CBI (Suède)	57
1.7.4.	Méthode CBI modifiée	58
1.7.5.	Formulation JSCE (Japon)	59
1.7.6.	Formulation LCPC (France)	59
1.7.7.	Formulation de l'Université de Sherbrooke (Canada)	60
1.7.8.	Autres formulations	61
1.7.8.1.	Formulation de l'Institut de Recherche de Construction de l'Island (Iceland)	61
1.7.8.2.	Formulation TFB (Suisse)	62
1.8.	Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état durci	62
1.8.1.	Résistances mécaniques	62
1.8.1.1.	Résistance à la compression	64
1.8.1.2.	Résistance à la traction	64
1.8.2.	Module de Déformation Longitudinal	64
1.8.3.	Retraits	65
1.8.4.	Fluage	68
1.8.5.	Adhérence avec le ferrailage	69
1.8.6.	Résistance au feu	70
1.8.7.	Corrosion des armatures	70
1.9.	Durabilité d'un BAP	71
1.9.1.	Perméabilité à l'eau	72
1.9.2.	Absorption d'Eau	72
1.9.3.	Perméabilité au Gaz	73
1.9.4.	Perméabilité aux ions Chlore	74
1.9.5.	Gel-Dégel des BAP	77
1.10.	Applications dans le monde	78
1.10.1.	Dans le monde	78
1.10.2.	Cas de l'Algérie	82
1.11.	Conclusion de la Partie Théorique	82

Chapitre 2 : Caractéristiques des Matériaux Utilisés et Formulations Adoptées

2.1	Généralités	84
2.2	Caractéristiques des matériaux utilisés	84
2.2.1	Le ciment	84
2.2.2	Le Laitier	85
2.2.3	Les Granulats	86
2.2.3.1	Le Sable	86
2.2.3.2	Le Gravier	86
2.2.4	Le Superplastifiant	87
2.2.5	L'eau de gâchage	88
2.3	Formulations adoptées	89
2.3.1	Formulation du Mortier	89
2.3.1.1	Rapport Eau/Liant (E/L)	91
2.3.1.2	Rapport Sable/Mortier	91
2.3.1.3	Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)	91
2.3.1.4	Confection des mortiers	92

2.3.2	Formulation du BAP de Référence	92
2.3.2.1	Fixation des rapports sable/mortier (S/M) et eau/liant (E/L)	93
2.3.2.2	Fixation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)	93
2.3.2.3	Confection des Bétons Autoplaçants	93
2.3.3	Substitution du ciment par du laitier	94
2.3.4	Mesure de la perte d'ouvrabilité	95
2.3.5	Conclusion	95

chapitre 3 : Procédure Expérimentale

3.1	Introduction	96
3.2	Essais relatifs au Mortier à l'état frais	96
3.2.1	Essai d'Etalement au Mini-Cône	96
3.2.2	Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)	97
3.2.3	Essai de la Chaleur d'Hydratation	97
3.3	Essais relatifs au BAP à l'état frais	99
3.3.1	Essai d'Etalement (Flow test)	99
3.3.2	Essai à l'Entonnoir en V (V-Funnel test)	101
3.3.3	Essai à la Couronne J (J-Ring test)	102
3.3.4	Essai à la boîte en L (L-Box test)	104
3.3.5	Essai à la boîte en U (U-Box test)	106
3.3.6	Essai de résistance à la ségrégation par tamisage (Sieve segregation resistance test)	107
3.3.7	Essai au cône d'Abrams modifié pour déterminer les paramètres rhéologiques	107
3.4	Essais relatifs au BAP à l'état durci	110
3.4.1	Résistance à la compression	110
3.4.2	Résistance à la traction	111
3.5	Récapitulatif du programme des essais réalisés	112
3.5.1	Essais sur Mortier	112
3.5.2	Essais sur Béton	113
3.6	Conclusion	114

Chapitre 4 : Résultats Expérimentaux et Interprétations

4.1	Introduction	115
4.2	Optimisation du rapport Sable/Mortier (S/M)	115
4.3	Effet des Superplastifiants sur le mortier frais	117
4.3.1	Etalement au mini-cône pour les Mortiers.....	117
4.3.2	Temps d'Écoulement à l'entonnoir en V pour mortiers	118
4.3.3	Effet du Laitier sur la Chaleur d'Hydratation	119
4.3.4	Effet du Laitier sur le besoin en eau	121
4.4	Effet du Laitier sur l'ouvrabilité des BAP à l'Etat frais	122
4.4.1	Mesures d'Etalement et du Temps T ₅₀ au cône d'Abrams	124
4.4.2	Mesure du Temps d'écoulement par l'essai d'Entonnoir en V (V-Funnel)	126
4.4.3	Mesure du Rapport H ₂ /H ₁ de l'essai de la Boîte en L (L-Box)	127
4.4.4	Mesures d'Etalement, du Temps d'Écoulement T _{50J} et de la Différence d'Hauteur B _J au cône d'Abrams en présence du J-Ring .	128 132

4.4.5	Mesure de la Hauteur de Remplissage à la boîte en U (U-Box)	132
4.4.6	Mesure de Résistance à la Ségrégation par Tamisage	133
4.4.7	Perte d'Ouvrabilité	135
4.5	Effet du Laitier sur la Rhéologie des BAP	136
4.5.1	Mesure d’Affaissement S au cône d'Abrams modifié	
4.5.2	Mesure du Temps d’affaissement partiel T_{100} au cône d’Abrams modifié	137
4.5.3	Effet du Laitier sur les Temps d’Ecoulement T_{20} et T_{40} de la boîte en L (L-Box)	138 140
4.5.4	Effet du Laitier sur le seuil de Cisaillement τ_0	141 143
4.5.5	Effet du Laitier sur la Viscosité μ	144
4.6	Effet du Laitier sur les résistances mécaniques des BAP à l'Etat durci	146
4.6.1	Mesure de la Résistance à la Compression	147
4.6.2	Mesure de la Résistance à la Traction	
4.7	Conclusion	148
		151
	Conclusion Générale et Recommendations	168
	Références	171
	Annexe A: broyage du laitier	174
	Annexe B : Exemple de calcul de la composition du mortier	179
	Annexe C : Exemple de calcul de la composition du béton	
	Annexe D : Données relatives à l’essai de la chaleur d’hydratation pour mortier ..	

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Liste des Figures :

Figure 1.1 :	Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP	29
Figure 1.2 :	Résumé du processus de fabrication du ciment	30
Figure 1.3 :	Représentation des principaux ajouts dans un diagramme SiO_2 – CaO - Al_2O_3	31
Figure 1.4 :	Critère de blocage et géométrie du calcul	35
Figure 1.5 :	Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment	39
Figure 1.6 :	Particules de ciment recouvertes de polymères à fort encombrement stérique	
Figure 1.7 :	Mesure du temps d'écoulement à l'Essai d'Orimet	43
Figure 1.8 :	Caisson : vue frontale et vue latérale	43
Figure 1.9 :	Rhéogramme du corps de Bingham et profil de vitesse en conduite	46
Figure 1.10 :	Rhéogramme d'un fluide newtonnien et d'un binghamien	46
Figure 1.11 :	Rhéomètre IBB	48
Figure 1.12 :	Rhéomètre BTRHEOM.	50
Figure 1.13 :	Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant	63
Figure 1.14 :	Retrait plastique de BAP et de béton ordinaire	66

Figure 1.15 :	Amplitudes maximales des BAP et Bétons ordinaires	66
Figure 1.16 :	Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant	68
Figure 1.17 :	Développement du Fluage du Béton	69
Figure 1.18 :	Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés selon	73
Figure 1.19 :	Perméabilité à l'état sec des formulations de BHP	74
Figure 1.20 :	Coefficient de migration des ions chlore de trois BAP (SCC) et de deux bétons vibrés correspondants	76
Figure 1.21 :	Coefficients de diffusion de BAP (SCC) et de bétons vibrés (TC)	76
Figure 2.1 :	Broyeur à boulet (laboratoire CETIM)	85
Figure 2.2 :	Courbes Granulométriques du sable et des graviers	87
Figure 2.3 :	Séquence de malaxage du mortier	92
Figure 2.4 :	Séquence de malaxage du béton autoplaçant	94
Figure 3.1 :	Essai d'Étalement pour Mortier	96
Figure 3.2 :	Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier	97
Figure 3.3 :	Dispositif expérimental pour la mesure de la Chaleur d'Hydratation.	98
Figure 3.4 :	Mesure du diamètre d'étalement	100
Figure 3.5 :	Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)	102
Figure 3.6 :	Dimensions du J-ring et positions pour mesure de Différence d'Hauteurs	103

Figure 3.7 :	Mesure d'étalement en présence du J-Ring	104
Figure 3.8 :	Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring	104
Figure 3.9 :	Dispositif de l'essai L-Box	105
Figure 3.10 :	Dispositif de la boîte en U (U-Box)	106
Figure 3.11 :	Essai de résistance à la ségrégation au tamis	107
Figure 3.12 :	Schémas de l'essai du cône d'Abrams modifié.	108
Figure 3.13 :	Mesure de l'affaissement au cône d'abrams modifié	109
Figure 3.14 :	Dispositif pour l'Essai de compression	111
Figure 3.15 :	Schéma de l'essai de traction par flexion à quatre points	112
Figure 3.16 :	Diagramme des essais réalisés sur mortier	112
Figure 3.17 :	Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais	113
Figure 3.18 :	Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci	114
Figure 4.1 :	Etalement en fonction du dosage en superplastifiant	117
Figure 4.2 :	Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant	118
Figure 4.3 :	Variation de la Température en fonction de l'âge du mortier	119
Figure 4.4 :	Quantité de Chaleur en fonction de l'âge du mortier	120
Figure 4.5 :	Effet du laitier sur le dosage en eau du mortier	121
Figure 4.6 :	Etalement en fonction de la teneur en Laitier	124
Figure 4.7 :	Temps d'Écoulement T50 en fonction de la teneur en Laitier	125
Figure 4.8 :	Temps d'Écoulement à l'Entonnoir en V en fonction de la teneur en Laitier	126

Figure 4.9 :	Rapport H2/H1 en fonction de la teneur en Laitier	127
Figure 4.10 :	Etalement sans et avec J- Ring avec PC en fonction de la teneur en Laitier	129
Figure 4.11 :	Etalement sans et avec J-Ring avec PNS en fonction de la teneur en Laitier	129
Figure 4.12 :	T50 sans et avec J- Ring avec PC en fonction de la teneur en Laitier	130
Figure 4.13 :	T50 sans et avec J- Ring avec PNS en fonction de la teneur en Laitier	130
Figure 4.14 :	Différence d'Hauteurs BJ en fonction de la teneur en laitier	131
Figure 4.15 :	Hauteur de Remplissage à la Boite en U en fonction de la teneur en Laitier	132
Figure 4.16 :	Résistance à la Ségrégation au Tamis en fonction de la teneur en Laitier	133
Figure 4.17 (a – c) :	Perte d'Ouvrabilité en fonction du temps	134
Figure 4.18 :	Variation de pente de perte d'ouvrabilité en fonction du temps	135
Figure 4.19	Effet du temps sur la perte d'ouvrabilité des BAP	
Figure 4.20 :	Affaissement S en fonction de la teneur en Laitier	137
Figure 4.21 :	Effet de la teneur en poudre sur l'affaissement	137
Figure 4.22 :	Temps d'Affaissement partiel T100 en fonction de la teneur en Laitier	138
Figure 4.23 :	T20 en fonction de la teneur en laitier	139
Figure 4.24 :	T40 en fonction de la teneur en laitier	140

Figure 4.25 :	Seuil de Cisaillement en fonction de la teneur en Laitier	141
Figure 4.26 :	Viscosité Plastique en fonction de la teneur en laitier	142
Figure 4.27 :	Variation de la Résistance à la Compression en fonction du Temps	144
Figure 4.28 :	Variation de la Résistance à la Traction en fonction du Temps	147
Figure A.1 :	Fonctionnement du Broyeur	170

Liste des Tableaux :

Tableau 1.1 :	Essais permettant la détermination de la capacité de remplissage	42
Tableau 1.2 :	Essais permettant la détermination de la capacité de passage	44
Tableau 1.3 :	Essais permettant la détermination des paramètres rhéologiques des BAP	48
Tableau 1.4 :	Composition des BAP en fonction du type d'agent de viscosité	59
Tableau 1.5 :	Exemples d'Application des BAP (selon ses caractéristiques)	80
Tableau 1.6 :	Exemples d'Application du BAP (selon la formulation utilisée)	81
Tableau 2.1 :	Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CPA CEM I 42.5	84
Tableau 2.2 :	Caractéristiques chimiques et physico-mécaniques du Laitier d'El Hadjar	86
Tableau 2.3 :	Caractéristiques des granulats	87
Tableau 2.4 :	Caractéristiques du PNS	88
Tableau 2.5 :	Caractéristiques du PC	88

Tableau 3.1 :	Classes des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation	101
Tableau 4.1 :	Composition et Résultats des essais sur mortiers pour différentes valeurs de S/M	116
Tableau 4.2 :	Résultats de demande en eau en fonction de la teneur en laitier	121
Tableau 4.3 :	Composition des BAP testés	122
Tableau 4.4 :	Résultats d'essais d'ouvrabilité	123
Tableau 4.5 :	Résultats d'essais de Rhéologie des BAP	136
Tableau 4.6 :	Résultats des résistances mécaniques en fonction de la teneur en laitier	143
Tableau B.1 :	Feuille Excel donnant composition et résultats des essais sur mortier	173
Tableau C.1 :	Feuille Excel donnant composition et résultats des essais sur BAP	178
Tableau D.1 :	Valeurs de Température des mélanges de mortier en fonction du temps	179

LISTE DES ABREVIATIONS

A	Quantité d'air, (m ³)
a	Coefficient fourni par le constructeur du calorimètre
A°	Unité Armstrong 10 ⁻¹⁰ m
A _{bs}	Coefficient d'absorption du sable
A _{bG}	Coefficient d'absorption du gravier
b	Coefficient fourni par le constructeur du calorimètre
BAN	Béton autonivelant
BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton de Haute Performance
B _J	Différence d'Hauteurs de béton au J-Ring
BO	Béton ordinaire
BTHREOM	Rhéomètre pour Béton
BV	Béton Vibré
C	Ciment
C (J/°C)	Capacité thermique du calorimètre et de l'éprouvette
CPA CEM I 42.5	Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
D _{max}	Diamètre maximal des Granulats
E/C	Eau/Ciment
E/F	Eau/Fines
E/L	Eau/Liant
E/F	Les fines
g	La pesenteur
G	Gravier
G/S	Gravier/Sable
G _{lim}	Volume absolu 1 m ³ de gros granulats
h _{avg}	Hauteur moyenne
K _{sf}	Taux de fines particules
L	Laitier de haut fourneau
LS	Lignosulfonate
M _b	Module de basicité
m _b	Masse du moule du calorimètre
M _c	Masse du ciment ou liant de l'éprouvette
m _l	Masse du liant (ciment + laitier)
m _e	Masse d'eau
m _g	Masse des granulats
MOR	Mortier
P	Poudre (Ciment + ajout).

PC	Polycarboxylate
PNS	Polynaphtalène sulfonate
POE	Polyoxyéthylène
q(t)	Chaleur d'hydratation
R _b	Risque de blocage
R _m	Vitesse relative
S	Affaissement final
SCC	Self-Compacting Concrete
S/M	Sable/Mortier
Sp	Superplastifiant
Sp/L	Superplastifiant/Liant
Sp/P	Superplastifiant/Poudre
SSB	Surface Spécifique de Blaine
T	Temps d'affaissement, (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 ₁₀₀	Temps d'affaissement partiel au cône d'Abrams modifié, (sec).
T _{VF}	Temps d'écoulement à l'entonnoir, (sec).
V _{crit,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 des vides, (m ³).
V _w	Volume d'eau, (m ³).

LISTE DES SYMBOLES

α (J/h°C)	Coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre
$\Delta\Theta$ (°C)	Echauffement de l'éprouvette par rapport à la température ambiante
Γ_m	Etalement relatif
γ	Gradient de vitesse, (s ⁻¹)
η	Viscosité, (Pa.s)
η_s	Humidité du Sable
η_G	Humidité du Gravier
Π	Pourcentage de laitance
ρ_C	Masse volumique du ciment
ρ_E	Masse volumique d'eau
ρ_G	Masse apparente du gravier
ρ_S	Masse volumique du sable
ρ_{Sp}	Masse volumique du superplastifiant
σ_f	Résistance à la traction par flexion
σ_t	Résistance à la traction
τ	Contrainte de cisaillement, (Pa)
τ_0	Seuil de cisaillement, (Pa)

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

A. Généralités

Le béton occupe la première place mondiale en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité et son faible coût. Il présente également d'autres qualités, telles qu'une excellente tenue au feu, une grande résistance aux chocs, une bonne protection contre les radiations nucléaires, etc... Toutefois, le matériau béton doit s'adapter de manière continue à de nouvelles exigences et à de nouveaux besoins.

Les besoins des divers intervenants dans un projet de construction ont évolué. Ainsi, les maîtres d'ouvrages exigent un béton durable. Cette notion de durabilité inclut à la fois son intégration dans l'environnement, la durée de vie du matériau et le processus de vieillissement. Les maîtres d'œuvre et les entreprises, quant à eux, cherchent à réduire autant que possible le coût et le temps de mise en œuvre tout en assurant une sécurité sans faille. Cela se traduit par l'utilisation de bétons à rhéologie contrôlée et conduisant à des résistances élevées. De plus, on observe sur les chantiers l'introduction des coffrages de grandes hauteurs dont le coût non négligeable impose un usage optimal. Les bétons nouveaux à forte valeur technologique et de composition complexe ont suscité de nouveaux besoins en matière de recherche comme la maîtrise de la formulation en terme de maniabilité et de résistance souhaitées, en terme d'architectonique et en terme de durabilité.

Au niveau de la maniabilité, nous disposons actuellement de bétons fluides qui peuvent être mis en œuvre sans vibration. Ces bétons ont été initialement mis au point par des chercheurs de l'université de Tokyo vers les années 1980. Il s'agit des bétons autoplaçants (BAP) utilisés pour les coulages d'éléments verticaux (poteaux, voiles) et des bétons autonivelants (BAN) destinés aux éléments horizontaux (dalles de compression, dallages, chapes flottantes). Ces bétons sont élaborés selon une formulation spécifique : fort dosage en sable et en éléments fins (filler, laitier ou cendres volantes), emploi de superplastifiants et éventuellement d'un agent colloïdal qui permet d'assurer l'homogénéité du mélange.

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se

compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

Bien que les connaissances sur les BAP soient suffisantes pour permettre leur utilisation, certains aspects restent à améliorer. En effet, leur composition spécifique nécessite la mise en place d'un contrôle soutenu de leur formulation, ainsi qu'un contrôle de leurs propriétés à l'état frais, avant mise en oeuvre. La maîtrise de ces matériaux n'est pas encore acquise, en témoigne la diversité des études menées afin d'appréhender le comportement des BAP.

Au cours des années, de nombreux progrès ont été apportés aux matériaux, et notamment au niveau de la formulation. L'utilisation de plus en plus croissante d'adjuvants de nature organique et/ou minérale a permis de modifier leurs propriétés rhéologiques. Un intérêt particulier se porte en ce moment sur les bétons fluides (autoplaçants, autonivellants ou pompés) qui se mettent en place sous l'effet leur propre poids. Néanmoins, l'arrivée de ces nouveaux matériaux s'est accompagnée de nouveaux problèmes :

- blocage de l'écoulement en conduite (écoulements bouchon).
- problèmes de pression sur les parois des coffrages.
- problèmes de redémarrage du pompage après un temps d'arrêt prolongé.
- ségrégation.

Les premiers BAP ont été confectionnés avec des ajouts de fluidifiants réduisant ainsi le rapport eau sur ciment (E/C) du béton. Les plastifiants ou les superplastifiants confèrent au béton une grande fluidité, puisqu'ils s'adsorbent à la surface des particules de ciment et agissent par effets stérique et électrostatique pour disperser ces particules. Cette fonction diminue d'une part le phénomène de floculation du ciment au contact de l'eau, et augmente d'autre part la proportion d'eau libre dans la suspension [1]. Cependant, les superplastifiants peuvent augmenter les risques de ségrégation et de sédimentation dans le béton. Le fait de leur associer des agents de viscosité aide à maintenir les granulats en suspension et permet au béton de garder un squelette granulaire bien réparti dans tout le volume.

Les différentes approches visant à concevoir des bétons autoplaçants ont abouti à des formulations de bétons ayant un volume de pâte plus important que celui des bétons

ordinaires, pour des résistances mécaniques égales. En effet, la présence de la pâte (mélange du ciment, des adjuvants, de l'eau efficace et des ajouts minéraux) remplit les vides et écarte les granulats, minimisant ainsi les frictions et les frottements. Ceci a pour conséquence d'améliorer l'ouvrabilité et l'écoulement du béton. Les BAP contiennent donc une quantité moins importante de gravier, et beaucoup plus de fines (particules inférieures à 80 microns). Les BAP sont caractérisés par une fluidité importante et surtout une diminution de la ségrégation et du ressuage. Pour obtenir ces propriétés, on ajoute de fortes teneurs en ajouts minéraux: fumées de silice, laitiers, cendres volantes, pouzzolanes et aditions calcaires. En effet la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granularités différentes permet également d'améliorer de façon générale la compacité du béton. D'autres parts les ajouts minéraux sont moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet de disposer d'un temps prolongé d'ouvrabilité. Ils ont aussi pour effet de réduire la chaleur d'hydratation. L'introduction du laitier dans les mélanges de béton améliore l'ouvrabilité, diminue la chaleur d'hydratation et diminue donc les risques de retraits et surtout minimise le coût global de fabrication du béton.

Différents matériaux sont de plus utilisés dans la réalisation d'un béton autoplaçant, comme les entraîneurs d'air, les retardateurs ou accélérateurs de prise, et les réducteurs d'eau. Aujourd'hui, les méthodes de fabrication et les produits de béton demandés par l'industrie sont de plus en plus compliqués et variés.

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

L'exploitation des matériaux locaux provenant des déchets de l'industrie, dans la fabrication des matériaux de construction, a toujours été une préoccupation d'autant plus qu'elle contribue à l'économie dans le domaine de construction.

Sans doute, parmi les déchets de l'industrie qu'il faut exploiter dans le domaine de la construction, les déchets des hauts fourneaux connus sous le nom de laitier. Ce dernier a la possibilité de devenir actif à une finesse au moins égale à celle du ciment. De ce fait est venue l'idée de substituer le ciment par du laitier afin d'obtenir un BAP riche en fines, qui peut améliorer ses qualités d'ouvrabilité et rhéologiques, sans pour autant, perdre les autres qualités essentielles telles que les résistances mécaniques. La problématique consiste donc à mener une étude approfondie afin de bien valoriser l'effet du laitier sur les différentes caractéristiques du BAP tant à l'état frais qu'à l'état durci.

B. Objectifs

La richesse de l'Algérie en terme de matériaux de construction n'est pas encore valorisée comme il se doit. Pour la mettre en valeur, il faut multiplier les efforts pour faire connaître cette richesse à travers des travaux de recherche pour mieux exploiter les matériaux existants. Les additions minérales telles que le laitier, la pouzzolane ou même les fillers sont disponibles en abondance en Algérie mais malheureusement non exploitées suffisamment comme additions aux mélanges cimentaires.

Le premier objectif de cette étude est de réaliser une étude d'optimisation pour trouver la meilleure formulation d'un béton autoplaçant à travers la valorisation du laitier du complexe sidérurgique d'El-Hadjar. Ce dernier est utilisé comme substitution partielle au ciment.

Le deuxième objectif dans cette étude est d'étudier et de comparer les effets de deux superplastifiants distincts appartenant à deux générations différentes, les naphthalènes sulfonate (PNS) et les polycarboxylates (PC) sur la rhéologie des BAP à l'état frais.

C. Plan de Travail

Ce travail est composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les caractéristiques du béton autoplaçant en tant que matériau, ses propriétés aux deux états, frais et durci, les différentes formulations pour la composition d'un BAP. Sont exposés, dans ce premier chapitre, des essais caractérisant l'ouvrabilité et la rhéologie des BAP et qui n'ont pas été réalisés dans le cadre de ce travail.

Le deuxième chapitre a été consacré aux caractéristiques des matériaux utilisés et les formulations qui ont été adoptées pour réaliser le travail expérimental dans le cadre de cette étude.

Le chapitre trois a été consacré à la présentation des différents essais, qui ont été réalisés dans le cadre de ce travail, caractérisant l'ouvrabilité et la rhéologie des BAP à l'état frais, et les essais mécaniques (compression et traction) des BAP à l'état durci.

Le chapitre quatre analyse et discute les résultats des différents essais réalisés.

Enfin une conclusion générale ainsi que des recommandations sont données pour de futurs travaux.

CHAPITRE 1

LE BÉTON AUTO-PLAÇANT – ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1

LE BÉTON AUTO-PLAÇANT – ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

La mise en œuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir-faire particulier.

La solution proposée a été d'utiliser un matériau très fluide, capable de se compacter sous son propre poids, sans vibration extérieure. Ces matériaux sont connus sous le nom de bétons autoplaçants, bétons autocompactants, ou bétons autonivellants, selon les applications [2]. Ils connaissent à l'heure actuelle un essor considérable en Europe et aux Etats-Unis. Les domaines d'application des BAP sont nombreux, mais leur utilisation implique une évolution ou une adaptation des moyens et des techniques traditionnellement employées.

Le béton autoplaçant BAP est désormais connu comme un béton très fluide, homogène, qui se met en place sous le seul effet de la gravité. Son développement a commencé au Japon à la fin des années 1980 pour des raisons économiques (réduction de la main d'oeuvre, rapidité de mise en place) et s'est progressivement répandu dans le reste du monde. En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire [3]:

1.1.1. Avantages techniques :

Avec l'apparition des BAP, les opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfaçage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un débullage dans le cas des applications horizontales. Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers trappes et échelles, sont réduits de manière significative. On peut résumer les avantages techniques dans les points suivants:

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé).
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.

- Réalisation d'éléments de forme plus complexe.

1.1.2. Avantages socio-économiques :

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

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

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

1.2. Définitions et caractéristiques d'un BAP

Les bétons autoplaçants (BAP), sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement.

Les essais, mis au point pour caractériser le matériau à l'état frais, concernent deux propriétés essentielles et indissociables des BAP : la fluidité et l'homogénéité. Apparaissant comme contradictoires, elles sont toutes deux nécessaires pour l'obtention d'une construction finale d'une qualité esthétique indéniable, mais également conforme aux exigences techniques préconisées. Or, en l'absence de défauts de parements (ressuage, bullage), les éventuelles pertes d'homogénéité ne sont pas décelables en surface. Elles se caractérisent par une séparation des gros granulats du fluide suspendant, ce qui est particulièrement néfaste pour les propriétés mécaniques finales de la structure. Il est donc indispensable de s'assurer en amont

que l'ensemble du matériau restera stable, aussi bien lors de la phase de mise en œuvre qu'après, i.e. durant la période dite « dormante » précédant la prise. Toutefois, il n'existe à l'heure actuelle que peu d'essais permettant de caractériser ce phénomène de séparation ou de ségrégation des gros granulats. De même, très peu d'études ont été menées afin d'appréhender les mécanismes mis en jeu lors d'un tel phénomène.

1.3. Domaines d'Emploi des BAP

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- possibilité de coulage de zones fortement ferraillées,
- possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles,
- obtention de très bonnes qualités de parement.

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrante utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables. Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en œuvre évoquées précédemment sont respectées, notamment du point de vue de la propreté des coffrages.

Le coulage d'un béton dans une zone très fortement ferraillée menait traditionnellement à un surdimensionnement de la pièce afin de rendre accessible tout point du bétonnage.

L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe. Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc. Walraven [4] précise cependant que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site car les BAP

sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes.

En effet, la formulation des BAP est particulière : utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite donc la mise en place d'un suivi plus important.

1.4. Mise en œuvre des BAP:

La principale différence, entre un BAP et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. La spécificité d'un BAP est d'être extrêmement fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mis en place. Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale.

En terme de mise en œuvre, les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Un autre avantage majeur des BAP est la réduction de la durée de la phase de coulage : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement du matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure est plus facile à réaliser.

1.4.1. Coulage

La méthode traditionnelle de remplissage par le haut du coffrage peut être utilisée avec une hauteur de chute plus importante. Il convient cependant de la limiter à 5m, pour éviter des problèmes de ségrégation dus à la chute du béton dans le coffrage [5]. L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau.

La fluidité des BAP permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux.

D'après les recommandations de l'AFGC [5], quel que soit le mode de remplissage retenu, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages. Une perte d'homogénéité peut en effet se manifester lorsque ce cheminement est trop important. Ainsi, la longueur de cheminement maximale préconisée est de 10 m. (Dans certains cas, elle peut être limitée à 5 m).

1.4.2. Coffrage

Différentes études ont montré que la pression exercée par les BAP sur les coffrages était plus faible que celle attendue, et dépendait de la vitesse de remplissage du coffrage [6, 7]. D'après Assaad et Khayat [8] l'augmentation de la vitesse de coulage de 5 à 25m/h induit une augmentation de pression de 15% de l'hydrostatique sans, toutefois, un effet significatif sur la chute des pressions avec le temps. Ceci proviendrait du caractère thixotrope du matériau, c'est à dire de sa capacité de structuration au repos [9]. La pression exercée par le BAP sur le coffrage dépendrait non seulement de la vitesse à laquelle il est mis en place mais également du mode de remplissage choisi. Lorsque le remplissage est effectué rapidement ou lorsqu'il est effectué en pied de coffrage, la pression latérale exercée sur le coffrage serait de l'ordre de la pression hydrostatique car le matériau n'a pas le temps de se structurer. En revanche, un remplissage plus lent et effectué par le haut du coffrage permet au matériau de se structurer et se comporte toujours comme un fluide [9].

Concernant la préparation des coffrages, notamment vis à vis de l'étanchéité et de l'absence de débris, les précautions à prendre sont similaires à celles pratiquées pour les bétons traditionnels [5]. Les recommandations de la FFB [10] précisent cependant que l'étanchéité en pied de coffrage est essentielle et que la propreté des coffrages est à vérifier tout particulièrement. En effet, l'aspect de surface des BAP étant un de leurs principaux atouts, il convient d'apporter un soin particulier à la préparation des coffrages. Ce temps de préparation supplémentaire n'est cependant pas pénalisant pour l'avancement du chantier et reste négligeable face au gain de temps apporté par la suppression de la phase de vibration.

Selon Matabee et al [11] la perte de pression pour un BAP, dans le cas de coulage par pompage, est de l'ordre de 40% par rapport au béton vibré. D'après Assaad et Khayat [12] la pression latérale exercée sur le coffrage d'un BAP ayant 650 ± 15 mm d'étalement est significativement influencée par la concentration des gros granulats. Plus le volume de ces derniers est important, moins importante est la pression maximale initiale et plus vite elle diminue.

1.4.3. Vibration

L'absence de vibration simplifie par ailleurs le calage des armatures et des réservations. Comme pour les bétons traditionnels, il convient de vérifier les conditions atmosphériques avant coulage. En dehors de la gamme 5-25°C, des dispositions particulières sont à prendre [10,13]. Andriamanantsilavo et al [14] ont étudié l'influence de la vibration sur la cinétique des pressions pour les pâtes (E/C=0.36). L'absence de vibration entraîne un

ralentissement du déroulement des différentes phases. Ce ralentissement est d'autant plus significatif que la hauteur du mélange augmente. L'absence de vibration retarde l'annulation de la pression de 90 minutes.

1.4.4. Cure

Une attention particulière doit être portée à la cure des BAP, c'est à dire à la protection mise en œuvre pour éviter l'évaporation, et particulièrement dans le cas d'applications horizontales. Le faible ressuage [2] des BAP les rend en effet plus sensibles au retrait plastique [5,15]. D'une manière générale, il est recommandé d'éviter une évaporation trop importante dans les premières heures après mise en œuvre [5]. D'après les recommandations de la FFB [10], comme pour tous les bétons ayant reçu un produit de cure, le ponçage ou le grenailage est obligatoire avant la pose de tout revêtement solidaire au support. Cette préparation doit être réalisée le plus tard possible dans le cas des bétons autonivellants (applications horizontales), au minimum après 28 jours. Rilem [16] confirme ce qui a été dit.

1.4.5. Transport

La réception du béton sur chantier doit permettre de vérifier l'aptitude du béton à être mis en œuvre sans aucune vibration et la conformité à la formule nominale. Cette opération est essentiellement basée sur la mesure de l'étalement.

En raison de sa fluidité élevée, le BAP ne peut être transporté qu'au moyen d'un camion malaxeur. Il est indispensable de faire tourner la toupie lentement pendant toute la durée du transport. Un clapet de fermeture est recommandé pour les transports dans des endroits à forte pente. Avant de décharger le béton, il faut faire tourner la toupie à vitesse élevée durant deux minutes environ [17].

1.5. Matériaux constituant un BAP

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chimique et morphologique. Ainsi, nous allons décrire, dans cette partie, les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (ciment, agrégats, eau, ajouts minéraux et adjuvants), et les paramètres influents.

Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. Les différents constituants proposées pour composer les bétons autoplaçants, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, sont: les granulats, les fines, le superplastifiant et parfois l'agent de viscosité. La figure 1.1 montre les composantes des deux types de béton, le béton ordinaire et le béton autoplaçant.

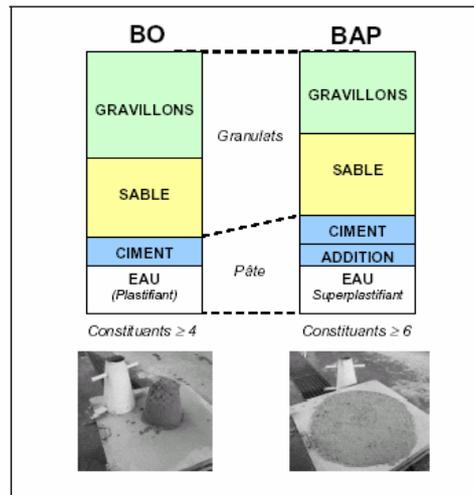


Figure 1.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP

1.5.1. Le ciment

Le ciment est obtenu par cuisson de mélanges de calcaire et d'argile. Le procédé de fabrication consiste à concasser et à broyer ces deux matières premières et à les mélanger dans des proportions bien définies. Au cours de cette opération des contrôles réguliers sont effectués de façon à toujours obtenir la même composition, les écarts sont corrigés par ajouts. Le mélange obtenu, appelé le cru est ensuite calciné dans un four rotatif porté à la température d'environ 1450°C. Les matériaux s'agglomèrent et fusionnent partiellement pour former des nodules durs et noirs de 5 à 30 mm de diamètre : le clinker. Celui-ci est constitué de quatre phases principales [18]:

- le silicate tricalcique ($\text{SiO}_2 - 3 \text{CaO}$), noté C_3S
- le silicate bicalcique ($\text{SiO}_2 - 2 \text{CaO}$), noté C_2S
- l'aluminate tricalcique ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 3 \text{CaO}$), noté C_3A
- le ferro-aluminate tétracalcique ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - 4 \text{CaO}$), noté C_4AF

Le clinker est alors broyé finement, du gypse est généralement rajouté afin de contrôler la vitesse de prise. La figure 1.2 [18] montre le processus de fabrication du ciment. D'autres types de ciment peuvent être obtenus en mélangeant le clinker broyé avec d'autres constituants broyés qui, eux aussi, présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques.



Figure 1.2 : Résumé du processus de fabrication du ciment [18]

1.5.2. Les ajouts minéraux

La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). Ainsi l'incorporation des ajouts minéraux à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton, à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO_2 de l'industrie cimentière dans la nature [19].

Les ajouts cimentaires ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner avec la chaux libérée par l'hydratation de C_3S et C_2S pour former un silicate de calcium hydraté de même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment portland. Généralement, ces ajouts peuvent être représentés sur le diagramme ternaire de la figure 1.3. Selon leurs activités avec le ciment ordinaire, les ajouts se divisent en ajouts pouzzolaniques qui réagissent et produisent d'autres hydrates et les fillers inertes qui ont un rôle de combler les interstices et diminuer la porosité [20].

L'ouvrabilité du béton contenant des ajouts minéraux est largement améliorée par rapport au béton au ciment ordinaire. Cette amélioration est souvent attribuée à la grande finesse et à la caractéristique des surfaces de leurs grains qui crée des zones de glissement

dans la pâte. En plus, la pâte de liant est augmentée par la présence d'un ajout plus léger ce qui engendre une faible cohésion entre les particules favorisant leur dispersion.

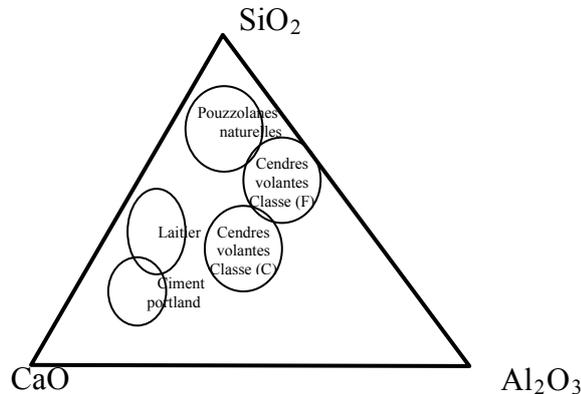


Figure 1.3: Représentation des principaux ajouts dans un diagramme $SiO_2 - CaO - Al_2O_3$ [20]

Les ajouts minéraux permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau [20]. Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les ajouts minéraux réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

Les ajouts minéraux substituant le ciment peuvent être classés en fines pouzzolaniques telles que la fumée de silice et la pouzzolane et fines inertes telles que le calcaire. Une autre classification est basée sur la source de chaque produit d'où on trouve :

Les produits artificiels:

- le laitier des Hauts Fourneaux
- les cendres volantes,
- la fumée de silice,
- l'argile calcinée (méta kaolin)
- les déchets d'incinération
- les déchets de briques concassées

Les produits naturels:

- la pouzzolane naturelle (cendres volcaniques, scories)
- le calcaire

- l'argile opaline
- les additions siliceuses (sable)

Parmi ces ajouts minéraux cités ci-dessus, nous avons choisi le laitier pour être un élément de substitution au ciment dans ce présent travail. On étudiera son influence sur la formulation d'un bon béton autoplaçant.

Le laitier des hauts fourneaux est un sous produit des usines sidérurgiques formé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une fois sorti du four, il subira un refroidissement rapide avec un jet d'eau qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment. L'utilisation de ce sous produit date de plus d'une centaine d'années où on enregistre la première production d'un ciment au laitier en Allemagne (1892) puis au USA (1896). Cependant, son utilisation a vu d'énormes difficultés à cause des faibles résistances engendrées, au cours des années, cette inquiétude a disparu par une optimisation entre les propriétés chimiques, le taux de verre et l'activité qui ont rendu le ciment au laitier très répandu aujourd'hui. Son utilisation en cimenterie s'est étendue à travers le monde à cause de sa performance acquise, son économie et sa réduction de l'effet de serre.

Il est bien prouvé que l'ouvrabilité des bétons au laitier est bien améliorée comparée à celle des bétons sans laitier. D'après Kadri et Duval [21] cette amélioration est souvent attribuée à la qualité de la surface de ses grains qui crée des points de glissement dans la pâte, à l'augmentation du volume de la pâte du liant à cause de sa faible densité et à une meilleure dispersion de ses particules. Par contre, il est constaté que la présence de la fumée de silice rend la pâte plus cohésive et le béton perd progressivement son ouvrabilité et devient plus collant. Ceci engendre une demande plus forte en superplastifiant qui est partiellement absorbé par les fines de cette silice. Brooks et al [22] trouvent que l'inclusion des ajouts minéraux et spécialement le laitier à 40% et plus retarde le temps de prise.

L'utilisation de filler calcaire dans les ciments complète, par sa grande finesse, la distribution granulométrique du mélange, ainsi il diminue le frottement inter-particules, assure une meilleure compacité du béton et libère une partie de l'eau de gâchage [23].

L'augmentation du dosage des fines dans un béton, pour un dosage constant en ciment, implique l'augmentation de la concentration volumique en solides et donc, favorise généralement la croissance de la viscosité du béton, par exemple les fines des laitiers de hauts fourneaux et les cendres micronisées ont de leur côté une faible demande en eau par rapport au ciment, et sont donc bénéfiques pour la formulation des bétons autoplaçants et à hautes

performances, puisqu'ils permettent de baisser la viscosité et d'améliorer les propriétés mécaniques des bétons [20,24].

La présence du laitier augmente la plasticité de la pâte par la diminution de la quantité de clinker réactive au jeune âge et réduction d'ettringite formé. Collins et Sanjayan [25] avaient trouvé que l'activation du laitier avec le NaOH donnait une faible résistance à jeune âge, mais combiné au Na_2CO_3 ils produisaient une résistance similaire à celle du béton ordinaire. Ils ajoutaient que le laitier sans gypse donnait une meilleure ouvrabilité que celui avec gypse. Nehdi et al [26] confirment que l'introduction d'ajouts minéraux en grande quantité, améliore la durabilité des BAP. Ainsi, pour des mélanges binaires, ternaires et même quaternaires, améliore l'ouvrabilité, donne de grandes résistances à long terme, bonne résistance au gel dégel, faible expansion du sulfate et une très faible perméabilité aux ions chlore.

Sharp et al [27] confirment que l'utilisation des ajouts minéraux, surtout le laitier aide à abaisser la chaleur d'hydratation et offre plusieurs autres avantages essentiellement environnementaux et économiques. Borsoi et al [28] exposent, dans leur article, l'importance des ajouts minéraux et plus précisément le laitier. En substituant le ciment par du laitier seul puis par du laitier et des cendres volantes puis par des cendres volantes uniquement, ils trouvent que les deux premiers mélanges, contenant du laitier, assuraient plus d'ouvrabilité que le troisième mélange. La résistance initiale à la compression est la plus élevée dans le premier mélange, contenant du laitier uniquement, et la pénétration des ions de chlore et le dioxyde de carbone est très basse pour les trois mélanges. Il est bien connu que le laitier restera inerte en absence de solution alcaline qui caractérise généralement les bétons jeunes. De ceci, une augmentation de la quantité du laitier retardera le début et la fin de prise. On a bien remarqué que le temps de début de prise passe de 2h20 à 2h35 et le temps de fin de prise passe de 2h25 à 2h40 lorsque le taux de laitier passe de 20 à 35%. Al-Otaibi [29] après avoir remplacé le ciment par 60% de laitier, trouve que la porosité a augmenté pour le même rapport eau/ciment, par contre la porosité a diminué pour une ouvrabilité constante.

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

additions comme les fines des laitiers de hauts fourneaux et les cendres micronisées ont de leur côté une faible demande en eau par rapport au ciment, et sont donc bénéfiques pour la formulation des bétons autoplaçants et à hautes performances, puisqu'ils permettent de baisser la viscosité et d'améliorer les propriétés mécaniques des bétons.

1.5.3. Les Granulats

Les granulats (sable et gravier) constituent le squelette du béton. La granularité et la compacité du squelette granulaire sec, ont une influence sur le comportement du béton à l'état frais. Un squelette granulaire plus compact, diminue le volume des vides dans le béton et laisse moins de vides à occuper par la pâte. Ainsi un volume de pâte est libéré par rapport à un squelette granulaire moins compact, contribuant à modifier l'écoulement du béton. Bien que Hu [30] considère que les granulats sont considérés comme un élément qui n'a pas une influence principale du point de vue rhéologique, Baron et Lesage [1] ont cependant montré que l'optimum de compacité du mélange granulaire sec correspond à l'optimum de fluidité du béton à teneur en eau constante. Pour un type de granulats, composé de gravier (G) et de sable (S), les auteurs ont montré qu'il existe un rapport (en masse) G/S optimal, correspondant à un affaissement maximal au cône d'Abrams.

Par ailleurs, le dosage des granulats peut avoir une influence sur les propriétés d'ouvrabilité des bétons. Pour obtenir un béton autoplaçant, le volume du gravier et la taille maximale des granulats ont été réduits pour diminuer les frictions et éviter les blocages dans des zones confinées.

L'importance des gros granulats sur la fluidité des bétons autoplaçants a pu être mise en évidence de même qu'il est recommandé d'utiliser des granulats roulés. En effet, les granulats roulés permettent de diminuer le risque de ségrégation. Il est considéré que le volume des gros granulats, dans le béton, est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. En effet ils ont constaté que plus la teneur en gros granulats augmente, plus la capacité de remplissage diminue, contrairement au rapport sable sur pâte qui lui n'influence pas sur le coefficient de remplissage. Le volume des gros granulats est donc limité et le rapport gravillon/sable est proche de 1 [31].

Dans son mémoire Abib [32] a étudié l'effet de la variation de dimension du gravier sur l'ouvrabilité et la résistance des BAP. Il a conclu que le diamètre d'étalement d'un BAP augmente lorsqu'on diminue le volume de gravier de la fraction 8/16.

Dans sa thèse Bethmont [33] explicite que la taille maximale D_{max} des granulats, étant un facteur non négligeable, peut provoquer un blocage. Il apparaît que le risque de blocage,

pour un ferrailage donné, augmente lorsque le diamètre maximum des granulats augmente. Jin [34] reporte que Fujiwara et al, ont calculé, dans le cas d'un ferrailage unidirectionnel (ferrailage vertical uniquement) et dans le cas d'un ferrailage bidirectionnel (ferrailage verticale et horizontal), un espacement minimum au-delà duquel le risque de blocage diminue. Ils obtiennent les critères présentés sur la figure 1.4 [34]:

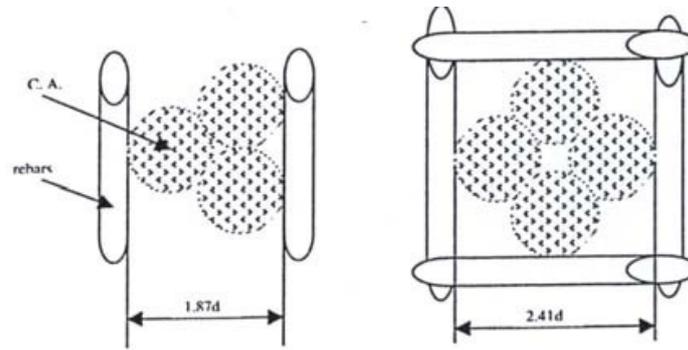


Figure 1.4 : Critère de blocage et géométrie du calcul, Jin [34]

$$\text{Cas 1: } e_{\min} = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)d \quad \text{Avec } d : \text{diamètre maximal des granulats} \quad (1.1)$$

$$\text{Cas 2: } e_{\min} = (1 + \sqrt{2})d \quad (1.2)$$

Domone et al [35] proposent que le diamètre maximal D_{\max} des granulats reste, de préférence, dans la limite de 20 mm. D'après Jin [34], la quantité de sable contenue dans le mortier doit également être contrôlée. Leurs 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.

En Allemagne à l'Université de Leipzig, König et al [36] ont utilisé du gravier de dimension maximale allant jusqu'à 32 mm pour la fabrication d'un béton autoplaçant dans le cadre de béton prêt à l'emploi, mais recommandent de prendre des précautions lors du coulage ainsi que lors du transport. El-Ariss [37] trouve que la quantité des gros granulats peut être réduite sans grande influence pour la résistance à la compression dans la limite de 0,3 à 0,4 du rapport Gros granulats sur la quantité totale des granulats.

Selon Felekoglu [38] afin de renforcer la contenance des fines dans le mélange du BAP, du sable riche en fines (15-20% en poids) peut être utilisé, mais la sélection du type de sable est très importante pour obtenir une bonne résistance à la compression avec un

minimum de superplastifiant. La valeur d'adsorption du bleu de méthylène est un bon indicateur de la contenance du sable en argile, cet essai peut être utilisé pour la sélection du type de sable contenant un grand volume de fines. De leur part, et très récemment, Menadi et al [39] trouvent que l'utilisation des sables contenant jusqu'à 15% de fines n'affectent pas la résistance du béton.

Selon Domone [40] la différence de résistance entre les mélanges contenant du gravier concassé et du gravier roulé est plus faible pour les BAP que pour les bétons ordinaires. Shobha et al [41] ont remplacé 20% de sable par du laitier granulé, ils ont trouvé que la résistance à la compression a augmenté dans les sept premiers jours comparativement à un BAP de référence mais a rechuté à 28 jours. Pour une substitution de 10% en laitier granulé, la résistance à la compression à 28 jours est plus élevée que celle du BAP de référence.

Très récemment Wu et al [42] ont confectionné un BAP avec du gravier léger, ils ont trouvé que ça donne un bon BAP du point de vue ouvrabilité et qu'il peut être utilisé dans la construction. Bassuoni et Nehdi [43] trouvent que le rapport Gravier/Sable (G/S) n'a aucune influence sur les propriétés physico-mécaniques des BAP.

1.5.4. L'eau de gâchage

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés [44] qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats.

L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent. Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. König et al [36] ont utilisé, avec succès, de l'eau recyclée pour la fabrication d'un béton autoplaçant dans le cadre de béton prêt à l'emploi.

1.5.5. Les adjuvants

1.5.5.1. Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des formes avancées de plastifiants. Ce sont des produits qui peuvent être ajoutés au béton en plus petite quantité que les plastifiants, soit au plus 2% du

poids du ciment, sans pour autant créer des effets secondaires (effet retardateur excessif, entraînement d'air). La compétition entre l'effet de défloculation et le ressuage détermine l'influence globale des superplastifiants sur la zone de transition interfaciale. Selon le rapport E/C utilisé, les superplastifiants peuvent avoir un effet bénéfique ou délétère. Avec un E/C de 0,55, le ressuage est dominant, ce qui occasionne une zone de transition interfaciale de moindre qualité dans la plupart des cas. Il s'agit par contre d'une situation extrême puisque l'utilisation des superplastifiants n'est généralement pas nécessaire à un tel rapport eau/ciment. Avec un E/C de 0,4, le compromis entre la défloculation et le ressuage se reflète bien, par l'excès de conductance interfaciale, l'ajout de superplastifiant et l'augmentation de son dosage apporte une meilleure dispersion des grains de ciment mais favorise également le ressuage. Le meilleur compromis est au point de saturation, où l'excès de conductance interfaciale est semblable avec et sans superplastifiant [45]. D'après des résultats antérieurs sur le même projet, à un E/C de 0,35, ces superplastifiants ont un effet bénéfique sur la zone de transition interfaciale. En conséquence, l'utilisation des superplastifiants comme réducteurs d'eau peuvent améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

Il existe plusieurs générations de superplastifiants, correspondant à différents polymères ou différentes configurations de ces polymères, qui ont été élaborées au cours des dernières années [45]. Les superplastifiants peuvent être regroupés de la manière suivante:

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

Un coulis (ciment + eau) est composé (au moment du mélange) de particules minérales électriquement chargées, qui sont dispersées dans une solution d'électrolytes. Le comportement rhéologique de ce coulis dépendra donc des propriétés de ces particules (concentration, dimensions, charges) et des électrolytes qui sont dans la solution [45].

Les phénomènes électrostatiques sont donc prédominants pour le comportement rhéologique d'un coulis. En raison de leurs compositions chimiques différentes, les particules de ciment peuvent présenter des charges différentes. Les charges opposées vont s'attirer les unes des autres. Les particules de ciment vont flocculer et augmenter la viscosité du coulis [45].

Par adsorption à l'interface solide-liquide, les plastifiants neutralisent les différentes charges des particules et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules (Figure 1.5). Par ailleurs, le fait que ces polymères sont adsorbés sur la surface des particules, va créer un encombrement stérique qui va rendre encore plus difficile le contact entre les particules (Figure 1.6). Cette action est plausible si on ne tient pas compte de l'interaction entre les phases du ciment et l'adjuvant [45].

En effet, ils sont composés d'une chaîne chargée venant s'adsorber à la surface des particules, sur laquelle sont greffées d'autres chaînes se déployant dans la solution. Uchikawa et al. [46] prouvent, pour la première fois, l'action des forces stériques responsables de la dispersion dans une pâte de ciment. Ces forces sont prépondérantes suivant la nature du polymère. Un polymère branché conduit à un effet stérique important du fait des longues chaînes, alors qu'un polynaphtalène est régi par l'effet électrostatique. Neubauer et al. [47] ont montré que l'effet stérique est très important dans la défloculation des pâtes de ciment.

Néanmoins, suivant la nature du superplastifiant utilisé les deux effets sont combinés, avec parfois une prédominance de l'un des deux. Nous pouvons ainsi distinguer, de manière très simplifiée, les polyélectrolytes (ancienne génération) des polymères greffés [18] (nouvelle génération). El-Barrak dans sa thèse [19] souligne que l'effet des polyélectrolytes, comme leurs noms le laissent supposer, est basé sur les répulsions électrostatiques. Ils viennent s'adsorber à la surface des particules de ciment créant ainsi une force répulsive par la présence de charges de même signe. Flatt et al. [48] étudient l'adsorption de superplastifiants sur des poudres modèles, avec un PH et un potentiel zeta identiques à celui d'une pâte de ciment. Ils relient la répulsion électrostatique au potentiel zeta.

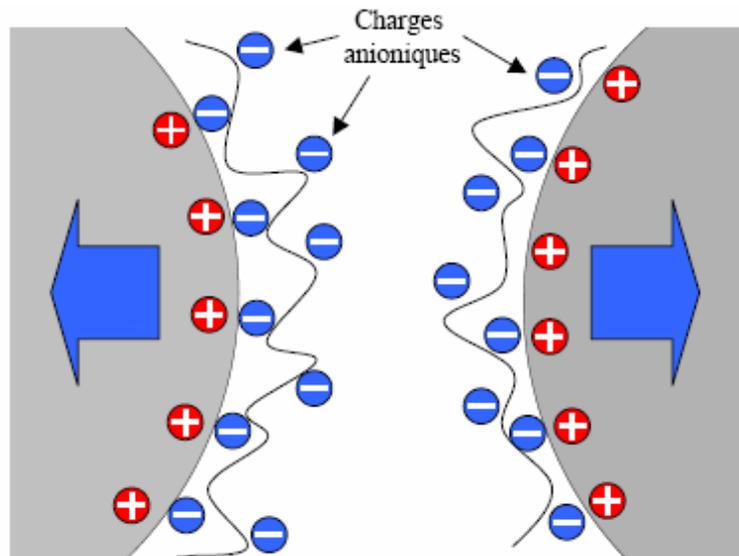


Figure 1.5 : Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment [19]

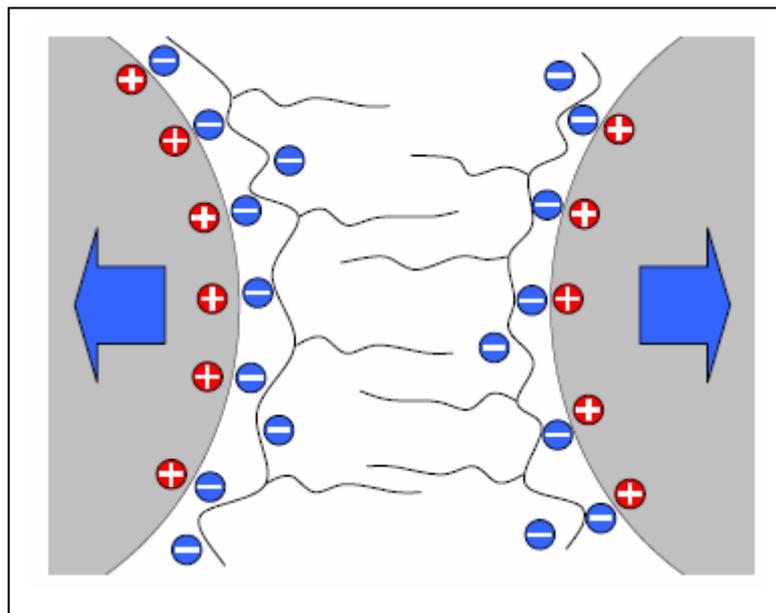


Figure 1.6: Particules de ciment recouvertes de polymères à fort encombrement stérique [19]

Les résultats obtenus par Björnström et Chandra [49] montrent que le mécanisme, par lequel les polymères dispersent les particules de ciment, est fondamentalement différent. Les superplastifiants avec sulfate ont entraîné une charge négative sur les particules de ciment, les dispersant par la répulsion électrostatique, tandis qu'avec le polymère poly-carboxylate, le mécanisme de dispersion est principalement contrôlé par un encombrement stérique.

Zemirline dans son mémoire [50] a comparé l'effet de trois (03) superplastifiants, les LS, PNS ainsi que les PC sur l'ouvrabilité des BAP et a confirmé que ces derniers confectionnés avec du PC ont donné de meilleurs résultats à cause de la meilleure compatibilité du PC avec le ciment.

Le temps optimal d'addition du superplastifiant dans le béton est 2 minutes après le mélange eau-ciment-agrégats [51]. A ce moment, le superplastifiant reste suffisamment disponible pour jouer son rôle de dispersant du C_3S et C_2S , et ce qui explique l'augmentation de la fluidité. D'autres part, Yamada et al [52] ont démontré que le retardement dans l'addition du superplastifiant dans le mélange est une manière efficace pour améliorer la compatibilité entre le ciment et le superplastifiant, les raisons, premièrement les différents comportement d'absorption du superplastifiant sur l'hydratation initiale dépendent du type du ciment, et deuxièmement les différents effets du superplastifiants sur l'hydratation initiale du ciment peuvent être évités.

Les phénomènes d'incompatibilité ciment- superplastifiant sont dus à une interaction entre le superplastifiant et le sulfate de calcium (gypse - $CaSO_4 - 2H_2O$) contenu dans le ciment, en empêchant ce dernier de débloquent l'hydratation du C_3A en formant une coquille d'ettringite. Ce problème d'incompatibilité se présente surtout dans les bétons à faible E/C (BHP). Dans tel cas on remarque une perte de fluidité (affaissement) rapide. Cependant, cette incompatibilité est très rarement remarquée dans les bétons avec un $E/C > 0,5$. En plus, Agarwal et al [53] ont trouvé que la compatibilité du superplastifiant avec le ciment dépend plus de la qualité du ciment ou du liant. Ainsi le ciment de classe 52,5 est plus compatible que les classes 32,5 et 42,5. En plus ils ont trouvé que le ciment au laitier était compatible avec tous les superplastifiants qu'ils ont utilisés.

Il semble qu'un des paramètres clés qui gouverne le comportement rhéologique des combinaisons ciment/polysulfonates est l'équilibre qui existe entre le nombre de sites actifs de la phase interstitielle et la quantité d'ions rapidement solubles [54]. S'il y a un bon équilibre entre ces deux valeurs, ou un excès d'ions, la combinaison ciment/superplastifiant sera compatible et robuste puisque finalement assez peu de polymères seront consommés par réaction de sa terminaison sulfonate avec le C_3A . Quand la concentration en ions est insuffisante, on voit alors de nombreuses molécules de polysulfonate disparaître de la solution interstitielle et se combiner avec le C_3A . La compatibilité et la robustesse de la combinaison ciment/superplastifiant est alors fonction de la valeur de ce déficit et de son évolution dans le temps ; plus ce déficit est grand, plus la combinaison est incompatible et non robuste. Un moyen simple de remédier à ce type d'incompatibilité et de robustesse est de rajouter une

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

1.5.5.2. Les agents de viscosité

En général les agents de viscosité utilisés sont des polysaccharides hydrosolubles. Il existe trois catégories générales pour les agents de viscosité : les polymères naturels, semi-synthétiques et synthétiques. Les polymères naturels ou biopolymères regroupent des produits tels que la gomme welan, la gomme xanthane et la gomme guar. Les polymères semi-synthétiques regroupent des produits tels que les dérivés cellulosiques comme ceux à base d'hydroxypropylméthyl cellulose (HPMC), d'hydroxyethyl cellulose (HEC) et de carboxyméthyl cellulose (CMC). Les polymères synthétiques regroupent les polymères à base de polyéthylène, de polyacrylamide et de vinyle [55].

Les agents de viscosité possèdent un rôle très important pour maintenir la stabilité des mélanges cimentaires. Ils assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements libres d'eau, réduisant le ressuage [56]. Au niveau rhéologique, ils agissent en augmentant à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité des mélanges [57].

Petersson et Billberg [58] ont démontré durant leur investigation sur le blocage des bétons autoplaçants, que l'utilisation d'un agent de viscosité provoque une perte d'ouvrabilité dans les BAP comparés à ceux qui contiennent uniquement des fillers. L'agent de viscosité donne plus de stabilité au BAP mais ne peut en aucun cas remplacer l'ajout minéral. Quand le blocage n'est pas le vrai problème, dans un mélange, l'agent de viscosité peut être utilisé, avec ou sans ajout minéral, pour garder la stabilité. Gibb [59] est sorti avec un nouveau produit, un seul adjuvant regroupant le superplastifiant à base de polycarboxylate et l'agent de viscosité du type gomme de Welan.

1.6. Propriétés d'un BAP à l'état frais

Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage). Les principales propriétés recherchées sur béton frais sont l'autocompaction, la fluidité, la viscosité et la stabilité envers la ségrégation. La formulation du BAP repose sur les mêmes bases

technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité). Par contre dans le cas du BAP, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides intergranulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l/m³. Dans le cas d'un mélange constitué exclusivement de granulats concassés, cette valeur peut même s'élever jusqu'à 100 à 120 l/m³. Cet excédent constitue une condition indispensable aux propriétés de fluidité exceptionnelles des BAP. Étant donné que le volume des vides du mélange varie en fonction de la nature et de la provenance des granulats, ceci peut entraîner des adaptations et modifications de la composition d'un BAP dans chaque cas particulier.

Les guides Européens pour le BAP [60], répartissent les BAP à l'état frais en quatre (04) propriétés essentielles suivantes, et propose des essais à réaliser pour chacune d'elles :

- la Capacité au Remplissage
- la Capacité de Passage
- la Résistance à la Ségrégation
- Rhéologie

Dans leur projet Européen, Petersson et al [61] se sont répartis la tâche pour essayer de sortir avec une série de tests (essais) sur les bétons autoplaçants à l'état frais et qui seront validés par la suite par les normes Européennes. Dans ce qui suit nous citerons les différents essais relatifs à chacune des ces propriétés, nous donnerons un aperçu sur les essais non réalisés dans le cadre de cette thèse, les essais réalisés dans le cadre de cette thèse seront exposés en détail dans le chapitre 3.

1.6.1. Capacité au remplissage

La capacité au remplissage du béton est définie comme l'habilité du béton à entreprendre un changement dans sa forme sous l'effet de son poids propre [62], même dans le cas de présence d'obstacles qui peuvent interférer avec son écoulement. Cette capacité au remplissage peut être déterminée à l'aide de deux dispositifs, le cône d'Abrams et l'Orimet (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Essais permettant la détermination de la capacité de remplissage

Propriété	Essais à réaliser
Capacité au Remplissage	<ul style="list-style-type: none"> • Etalement au Cône d'Abrams (Slump-Flow) • Temps à T₅₀ au cône d'Abrams (T₅₀ Slump-Flow) • Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel) • Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test) • Etalement au Tube Orimet (Orimet) • Essai du caisson (Fill Box)

a/ Essai Orimet

L'essai Orimet a été développé à l'Université de Paisley (Ecosse – Grande Bretagne) comme une méthode de mesure d'un mélange de béton frais sur site. L'essai est basé sur le principe d'un orifice rhéomètre. L'orimet est un tube vertical qui se termine avec un cône de diamètre final (orifice) de 80 mm ce qui est valable pour la mesure du passage d'un mélange de béton contenant des granulats de grosse dimension n'excédant pas 20 mm [63].

L'opération consiste à remplir l'orimet en béton puis ouvrir la trappe inférieure et mesurer le temps jusqu'à apparition de la lumière au fond de l'orimet en regardant du haut (Figure 1.7). Cette essai mesure la facilité d'écoulement du béton, plus le temps est court plus l'ouvrabilité est grande. Pour un bon béton autoplaçant le temps d'écoulement ne doit pas dépasser 05 secondes [64].



Figure 1.7 : Mesure du temps d'écoulement à l'Essai d'Orimet

b/ Essai du caisson (Fill Box)

Cet essai est utilisé pour mesurer la capacité au remplissage du béton autoplaçant avec une dimension maximale de granulats de 20 mm. L'appareillage consiste en un container (transparent) avec une surface plate et lisse. A l'intérieur du container il y a 35 obstacles en PVC de 20 mm de diamètre et distances axiales de 50 mm (Figure 1.8). Pour faciliter l'opération de remplissage, le container est muni d'un tube terminé par un entonnoir.

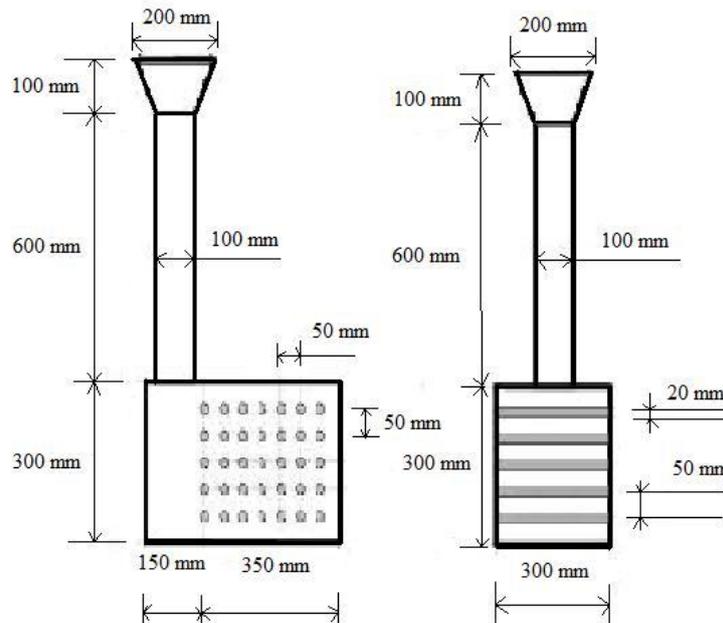


Figure 1.8: Caisson : vue frontale et vue latérale

Il s'agit de remplir à débit constant (remplir le tube en ajoutant chaque 5 secondes environ 1,5 litres de béton) le caisson jusqu'à ce que le béton commence à couvrir la ligne supérieure des obstacles, pour cela il faut environ 45 litres de béton. Une fois le béton stabilisé, mesurer la hauteur du béton du côté du tube (hauteur h_1) ainsi que la hauteur du côté opposé (hauteur h_2). Calculer ensuite le pourcentage de remplissage moyen R d'après la formule suivante [63]:

$$R(\%) = 100\% \cdot \frac{h_1 + h_2}{2 \cdot h_1} \quad (1.3)$$

Si le béton coule aussi librement que l'eau, au repos on aura une surface horizontale ($h_1=h_2$) et donc $R(\%)=100\%$. Un béton peut être considéré comme autoplaçant si le rapport est supérieur à 90% [63].

1.6.2. Capacité de passage

La capacité de passage décrit la capacité du mélange de béton frais à l'étalement à travers des espaces confinés sans ségrégation, sans perte d'uniformisation et sans blocage. En définissant la capacité de passage, il est nécessaire de considérer, la géométrie et la densité du ferrailage, la capacité de remplissage du mélange ainsi que la dimension maximale du granulats.

La dimension à définir est l'espacement entre les bars, cet espacement doit permettre l'écoulement normal du béton. L'espacement entre la barre de ferrailage et le coffrage n'est pas à considérer car le béton peut contourner la barre et n'aura pas besoin de s'étaler continuellement à travers cet espace. La capacité de passage peut être déterminée à l'aide de trois dispositifs, le cône d'Abrams en présence du J-Ring, la boîte en L (L-Box) et la boîte en U (U-Box) (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Essais permettant la détermination de la capacité de passage

Propriété	Essais à réaliser
Capacité de passage	<ul style="list-style-type: none"> • Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test) • Temps à T_{50} au cône d'Abrams en présence du J-Ring • Différence d'Hauteurs au J-Ring • Essai de la Boite en L (L-Box test) – Mesure de H_2/H_1 • Essai de la boite en U (U-Box test)

1.6.3. Résistance à la ségrégation

La résistance à la ségrégation est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité sur site du béton autoplaçant. Le BAP peut souffrir de la ségrégation durant la mise en place et après mais avant son durcissement. La ségrégation qui se produit après la mise en place est la plus défavorable surtout pour les longs éléments et même pour les éléments minces comme les dalles, ça peut mener vers des dégradations de surface comme sa fissuration.

La résistance à la ségrégation devient un paramètre important dans le cas de classe élevée de fluidité ou de faible viscosité, ou bien dans le cas où les conditions de mise en place encouragent la ségrégation. Si aucun de ces cas ne se présente, il n'est généralement pas nécessaire de spécifier la classe de la résistance à la ségrégation. L'essai de la résistance à la ségrégation des BAP est l'essai au tamis de 5 mm.

1.6.4. Rhéologie des BAP

1.6.4.1. Définition de la rhéologie

La rhéologie est une branche de la mécanique qui étudie l'écoulement des matériaux et l'interaction entre les états de sollicitations (contraintes) et les déformations, en fonction de leurs caractéristiques de viscosité, d'élasticité et de plasticité.

Comme certains matériaux ne répondent pas exactement à la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides, le vocable « rhéologie » a été inventé par des physiciens spécialistes de l'étude des matériaux dirigés par E.C. Bingham [65]. Entre le solide parfait et le liquide parfait newtonien, il est apparu nécessaire d'élaborer cette discipline nouvelle. L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis son apparition en 1928 [66] avec l'apparition de nouvelles substances au comportement complexe tel que : pâtes, boues, suspensions, émulsions, polymères, etc. Pour le cas du béton, on s'intéressera à l'étude de l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable.

Certaines substances qui peuvent s'écouler montrent toutefois une capacité à conserver une certaine forme sans que cette matière ne soit soutenue par un moule. Par exemple, du béton dans un cône d'affaissement aura exactement la forme du moule et lorsque le moule est soulevé, le béton adopte une nouvelle forme pour laquelle toutes les forces de cisaillement sont inférieures à la résistance en cisaillement du béton. C'est l'existence de ce seuil de cisaillement qui fait que le béton peut conserver cette forme malgré la force de gravité qui tend à niveler le béton complètement [66]. De tels corps montrant un seuil de cisaillement avant écoulement sont non Newtonien et dit plasto-visco-élastique. Un cas particulier de ce type de comportement est le cas du corps de Bingham (Figure 1.9) lequel présente une relation linéaire entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement après avoir franchis le seuil de cisaillement [66].

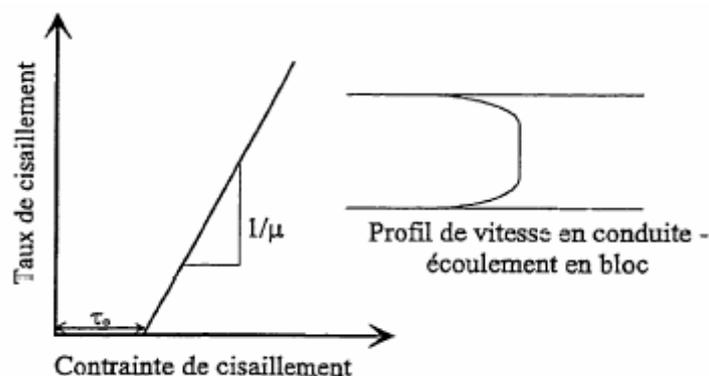


Figure 1.9 : Rhéogramme du corps de Bingham et profil de vitesse en conduite [66]

D'après Couarraze et Grossiord [66], Bingham modifie de la façon suivante l'équation de base de Newton :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1.4)$$

Dans cette équation, les deux coefficients sont constants et caractérisent entièrement le comportement rhéologique du matériau. Le premier, τ_0 est le seuil de cisaillement et le deuxième, μ est la viscosité plastique. Ceci implique que si une seule mesure couple-vitesse (ou contrainte de cisaillement et taux de cisaillement) est effectuée (Figure 1.10), le corps de Bingham ne peut être différencié de celui de Newton car une droite ne passant pas par l'origine doit nécessairement être définie par au moins deux points [66].

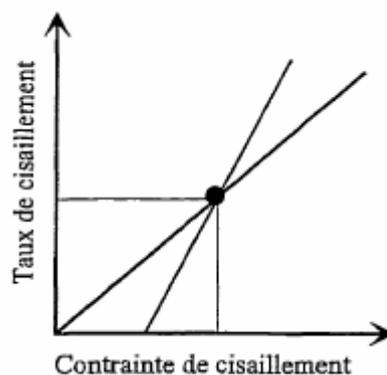


Figure 1.10 : Rhéogramme d'un fluide newtonnien et d'un binghamien [66]

Tous les fluides plastiques présentent un écoulement à noyau ou écoulement en bloc. En conduite, si la pression appliquée pour déplacer le corps n'est pas assez élevée pour vaincre le seuil de cisaillement pour toute la masse du corps, au centre, le corps se déplacera en bloc alors qu'en périphérie, le corps s'écoulera comme un liquide. L'exemple le plus familier est celui de la pâte dentifrice qui sort en boudin lorsqu'on presse le tube. Le noyau est très important car la pression appliquée est faible.

1.6.4.2. Comportement rhéologique des BAP à l'état frais

Les propriétés déjà mentionnées sont obtenues grâce à une teneur très élevée en farines ($\leq 0,125$ mm) qui, ensemble avec l'eau et l'adjuvant fluidifiant, constituent le coulis de ciment, sous forme d'une suspension colloïdale à viscosité élevée, dans laquelle nagent les granulats plus grossiers sans aucune tendance à la ségrégation. A cet égard, il est en principe indifférent que les farines proviennent du ciment, de cendres volantes, de fumée de silice ou

de fillers minéraux, dans la mesure où les interactions entre la suspension et le fluidifiant permettent d'atteindre les caractéristiques rhéologiques nécessaires.

En plus de la fluidité élevée généralement obtenue avec les bétons fluides, ce coulis (suspension) présente une certaine viscosité, c'est-à-dire un comportement analogue à celui du miel ou de certaines huiles minérales très visqueuses. C'est la combinaison de cette viscosité avec une fluidité très élevée qui confère au béton sa stabilité envers la ségrégation ainsi que sa capacité à se désaérer naturellement. Il est généralement admis que le comportement du béton frais est bien représenté par le modèle Binghamien après qu'un cisaillement ait été imposé pendant un certain temps [65].

En plus de la fluidité, la viscosité du béton constitue un second critère important pour caractériser le comportement du BAP. Elle peut être déduite à partir de la mesure des frottements internes d'un matériau sous l'effet de sollicitations imposées (contraintes de cisaillement). La viscosité η est d'autant plus faible que ces forces de frottement internes sont petites. Le béton s'écoule et s'étale d'autant plus rapidement que la viscosité est faible.

Pour assurer une bonne stabilité au béton, Skarp et al [67] ont introduit au mélange une matière qu'ils ont appelé Modified Colloidal Silica (MCS) qui réagit avec les ions calcium pour former un calcium-silicate-hydrate (C-H-S). Ce dernier agit comme stabilisateur et exhibe les capacités d'un filler.

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment [68]. Shi et al. [69] montrent par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou une même valeur de seuil.

Lors de la fabrication du béton autoplaçant, on s'efforce par conséquent d'ajuster sa fluidité et sa viscosité de manière à permettre une mise en œuvre optimale. La viscosité du béton est généralement caractérisée par le temps d'écoulement nécessaire, par exemple lors de l'essai d'entonnoir, ou le temps nécessaire à l'obtention d'un diamètre fixé lors de l'essai d'étalement. Le tableau 1.3 donne les différents essais permettant la détermination des paramètres rhéologiques des BAP.

Tableau 1.3 : Essais permettant la détermination des paramètres rhéologiques des BAP

Propriété	Essais à réaliser
Mesures Rhéologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Affaissement 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

a/ Essai au Rhéomètre IBB

La première méthode utilisée pour l'étude de la thixotropie d'un mélange est effectuée grâce à l'utilisation d'un rhéomètre IBB (Figure 1.11).



Figure 1.11 : Rhéomètre IBB

Le protocole d'essai consiste à maintenir un mobile dans un mouvement de rotation à une vitesse constante. On peut alors en déduire le torque, c'est-à-dire le couple appliqué pour le cisaillement. Le couple maximal correspond à la mesure initiale. Ceci est dû notamment au phénomène de floculation du ciment, qui fait qu'il est nécessaire d'appliquer une force plus importante lorsque l'on débute le cisaillement. Le couple exercé a tendance à diminuer car l'échantillon de béton exerce une résistance moins importante sur le mobile. On fait varier la vitesse de rotation à 0.3, 0.5, 0.7 et 0.9 tour/seconde. Chaque vitesse est maintenue sur une durée de 25 secondes, après un temps de repos de 4 minutes.

La seconde phase de l'essai consiste à relier la thixotropie avec le développement de la pression latérale des coffrages. La méthode d'essai consiste à remplir avec le mélange étudié

un tube en PVC rigide de 200 mm de diamètre et de 2100 mm de hauteur. On mesure alors les pressions latérales exercées sur le tube grâce à la mise en place de capteurs de pression, préalablement étalonnés. Les capteurs sont placés le long du tube à une distance de 50, 250, 450, 850 et 1250 mm à partir du bas du tube.

b/ Essai de deux-Points de Tattersal

C'est le premier et le plus largement connu instrument pour mesurer les propriétés d'écoulement du béton. L'appareil se compose d'un seau contenant le béton à examiner. Une palette de la géométrie spéciale, ou la roue à aubes, est abaissée dans l'échantillon. La roue à aubes commence à tourner et la résistance sur la roue à aubes due au matériel, c.-à-d. le couple, est mesurée. A mesure que la vitesse de la rotation de la roue à aubes est augmentée une courbe du couple contre la vitesse est enregistrée. Le graphique obtenu est linéaire, donc l'effort est extrapolé au couple à la vitesse nulle pour donner l'effort de fléchissement et la viscosité en plastique est liée à la pente de la courbe.

c/ Essai à l'appareillage de Bertta

Cet appareillage d'essai a été développé au centre technique de recherches de la Finlande. Le béton est placé entre deux cylindres concentriques des diamètres de 480 millimètres et de 330 millimètres. Le cylindre externe tourne en mode oscillant. L'opérateur choisit la fréquence et l'amplitude. Le couple induit par le mouvement est mesuré dans le cylindre intérieur. Cette configuration permet à l'opérateur de calculer la viscosité et l'effort de fléchissement du béton en fonction de la fréquence. L'avantage de cet instrument est qu'il permet à l'opérateur de calculer les paramètres rhéologiques intrinsèques des matériaux et non seulement de deux valeurs reliées, telles que g et h (dispositif de Tattersall).

d/ Essai au rhéomètre de BTRHEOM

Le rhéomètre, BTRHEOM, a été développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), par De Larrard. Il se compose d'un seau avec un fond dentelé, et d'une roue supérieure tournante se reposant sur le béton (Figure 1.12). La distribution d'effort de cisaillement permet le calcul direct de l'effort de viscosité et de fléchissement selon des équations fondées sur l'hypothèse que le béton est un fluide de Bingham. Si cette prétention n'est pas correcte, un autre ensemble d'équations devra être établi en utilisant le rapport correct entre le taux de cisaillement et l'effort de cisaillement.

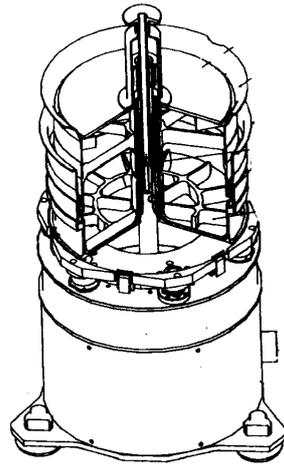


Figure 1.12 : Rhéomètre BTRHEOM.

1.6.5. Facteurs clés des propriétés des BAP à l'état frais

Le comportement et les propriétés d'un béton autoplaçant à l'état frais dépendent étroitement de ses caractéristiques rhéologiques. L'expérience de ces dernières années a permis de rassembler des informations suffisantes pour cerner les valeurs limites de certains paramètres déterminants pour l'obtention d'un BAP. A cet égard, il convient de ne pas oublier que l'ouvrabilité et les propriétés d'un béton à l'état frais sont fonction du temps et qu'elles évoluent rapidement. Ainsi, lors d'essais préliminaires pour la production du BAP en centrale de béton prêt à l'emploi on veillera à ce que les performances d'ouvrabilité requises soient assurées à l'arrivée du béton sur le chantier, pour cela les points suivants sont des facteurs clés pour avoir un bon BAP à l'état frais:

a/ Type de ciment

L'influence du ciment sur l'ouvrabilité dépend de sa composition minéralogique, de sa finesse de mouture et des adjuvants avec lesquels il est utilisé simultanément. Le type de ciment affecte surtout la rhéologie initiale du mélange de béton. La composition du ciment, par exemple la teneur en C_3A qui réagit très rapidement, va déterminer la rhéologie du mélange. Beaupré et Mindess [70] ont effectués des essais avec trois types de ciment. Quand tous les autres paramètres sont constants, un mélange fabriqué avec du ciment type 50 (classe 52,5 norme européenne) montre le plus faible seuil de cisaillement, un mélange fait avec du ciment type 30 (classe 32,5 norme européenne) avec fumée de silice montre le plus grand seuil de cisaillement et un mélange fait avec du ciment type 30 présente un seuil de

cisaillement entre les deux précédents. La viscosité plastique demeure constante en général [70].

b/ Dosage en eau

Le dosage en eau peut être utilisé comme grandeur de référence de la même manière que pour un béton conventionnel vibré. Si le béton autoplaçant est trop fluide (viscosité trop faible, ouvrabilité trop élevée) et présente une forte tendance à la ségrégation, on pourra réduire la quantité d'eau dans la pâte de ciment. Si nécessaire, l'ouvrabilité du béton pourra être adaptée en augmentant le dosage en adjuvant fluidifiant.

Très récemment Hwang et Khayat [71] ont trouvé qu'une composition de BAP a une considérable influence sur l'apparition des fissures. Ainsi une composition à $E/C = 0,42$ prend 26 à 37% plus de temps avant l'apparition des fissures qu'une composition à $E/C = 0,35$ en utilisant le même superplastifiant. Par contre la première composition montre un plus grand retrait plastique que la deuxième, d'après les auteurs ceci est dû au fait que la composition à $E/C = 0,42$ a un plus grand volume de pâte et moins de gros granulats (en volume).

c/ Excédent de pâte de ciment

Un excédent de pâte de ciment dépassant 90 l/m^3 peut s'avérer nécessaire en cas de faible valeur du rapport E/C ou d'une proportion élevée de granulats concassés. L'étanchéité et la résistance à la compression d'un tel béton s'en trouveront améliorées. Si le volume excédentaire de pâte de ciment est nettement inférieur à 90 l/m^3 , on doit s'attendre à un étalement plus faible, ainsi qu'à une tendance accrue à l'apparition de blocages au droit des barres d'armatures, de nids de gravier et de bullage sur les parements.

d/ Quantité de fines ($<80\mu\text{m}$)

Pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP doivent contenir une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m^3) supérieure à celle des bétons ordinaires. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire voire ternaire.

L'ajout de fumée de silice augmente le seuil de cisaillement à partir d'une teneur de 7%. A un dosage inférieur à 7% en fumée de silice, un effet négligeable a été observé [70]. Aussi, si la teneur en ciment est faible, l'augmentation du seuil de cisaillement se fait moins sentir. Le comportement des bétons renforcés de fibres est Binghamien, lorsque la quantité de

fibres augmente, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement augmentent aussi. Lorsque la longueur des fibres augmente, seul le seuil de cisaillement augmente.

e/ Choix et dosage des Adjuvants

Les superplastifiants sont généralement utilisés pour des bétons à faible rapport E/C. Généralement, on observe une diminution du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la concentration en superplastifiant alors que la viscosité plastique ne change pratiquement pas [72]. Un autre effet des superplastifiants est la perte rapide de l'affaissement dans le temps. Un béton non superplastifié sera relativement stable dans le temps quant à ses propriétés rhéologiques alors qu'un béton superplastifié peut montrer une prise beaucoup plus rapide ou une prise anormalement retardée à de très hautes concentrations en superplastifiant [65].

L'efficacité d'un adjuvant peut être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés (compatibilité). De plus, un dosage élevé en adjuvant retarde généralement le début de prise. L'utilisation d'un adjuvant stabilisateur permet de réduire le risque de ségrégation du BAP (ressuage, granulats grossiers coulant vers le bas), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C. Dans chaque cas, il convient donc de sélectionner les adjuvants les mieux appropriés à un ciment donné au moyen d'essais préliminaires. Sinon, il faut s'attendre à devoir recourir à des dosages élevés en adjuvants, voire à l'apparition d'un raidissement prononcé avec perte des performances recherchées du BAP [17].

g/ Agents entraîneurs d'air

La teneur en air affecte le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Lorsque la teneur en air augmente ces deux derniers paramètres sont réduits.

h/ Granulats

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 zones confinées, 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. Bien évidemment ce rapport peut être revu à la hausse si le confinement est faible, ou à la baisse dans le cas contraire. Comme mentionné précédemment,

le diamètre maximal D_{\max} des gravillons doit rester en dessous de 20 mm pour minimiser le risque de blocage.

D'autre part le sable est un facteur important pour la fabrication du BAP vu qu'il a une influence déterminante sur ses propriétés à l'état frais. Si la proportion de sable augmente par rapport au gravier, la demande en eau et le rapport E/C augmentent, tandis que la viscosité diminue. Et inversement en cas de diminution de la proportion de sable. Le sable présente une demande en eau réduite lorsque sa teneur en fines est faible [17].

i/ Temps

L'hydratation du ciment se fait dans le temps. C'est la période dormante qui donne de deux à quatre heures de maniabilité au béton. Cependant, même si la réaction d'hydratation du ciment est ralentie à ce moment, une perte de maniabilité est observable. La perte de maniabilité dans le temps peut être mesurée en terme d'augmentation du seuil de cisaillement et de l'augmentation également de la viscosité plastique.

j/ Température

La température a un effet indirect sur la rhéologie du béton. Habituellement, la température joue directement sur la viscosité d'un matériau. Pour le cas du béton frais, la température est une des causes de l'augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment qui provoque la perte de maniabilité rapide dans le temps. La température exerce une influence sur la viscosité de la pâte de ciment et par conséquent sur les propriétés rhéologiques du béton mais cet effet est de beaucoup moindre importance.

1.7. Formulations et Compositions des BAP

La formulation du BAP repose sur les mêmes bases technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité). Par contre dans le cas du BAP, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides intergranulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l/m³. Dans le cas d'un mélange constitué exclusivement de granulats concassés, cette valeur peut même s'élever jusqu'à 100 à 120 l/m³. Cet excédent

constitue une condition indispensable aux propriétés de fluidité exceptionnelles des BAP. Étant donné que le volume des vides du mélange varie en fonction de la nature et de la provenance des granulats, ceci peut entraîner des adaptations et modifications de la composition d'un BAP dans chaque cas particulier.

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage, etc.) rendent leur formulation relativement compliquée. Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis [31].

Réaliser un béton autoplaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP.

Il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant; chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation.

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales et quelques de ses modifications.

1.7.1. Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)

Considérée comme la méthode générale de formulation, la formulation OKAMURA a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura, d'après Ozawa et al rapporté par [73]. 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. Ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés:

$$G = \frac{50}{100} G_{\text{lim}} (1 - A) \quad (1.5)$$

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:

$$S = \frac{40 (1 - A - G)}{100 (1 - K_{sf})} \quad (1.6)$$

Où: K_{sf} = taux de fines particules (<0.09 mm) dans le sable

- L'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%
- L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir en V) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône).

Les auteurs définissent alors deux grandeurs: étalement relatif et vitesse relative d'écoulement.

La fluidité du mortier, donnée par: $\Gamma_m = \frac{(r_1 r_2 - r_0^2)}{r_0^2}$ (1.7)

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

La viscosité du mortier, donnée par: $R_m = \frac{10}{t}$ (1.8)

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

Selon les auteurs, ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de Γ_m est élevée, plus le mortier est fluide) et la viscosité du mortier (plus la valeur de R_m est faible, plus la viscosité est élevée). Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément $\Gamma_m=5$ et $R_m=1\pm 0,1$. 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.

1.7.2. Formulations modifiées de la méthode générale

La méthode générale n'est pas adaptée pour formuler des bétons avec des agents de viscosité, pourtant elle conduit à la formulation de bétons très visqueux [74]. De ce fait,

plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode. Les modifications ont touché surtout les dosages en gravier et en sable.

1.7.2.1. Kochi University of Technology (Japon)

Edamatsu et al [75] ont réussi grâce à l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) à augmenter le dosage de sable dans le mortier à plus que 40% et à réduire donc le volume de pâte, et particulièrement du ciment, dans le béton.

1.7.2.2. University of Tokyo (Japon)

Ouchi et al rapporté par [73] ont proposé une méthode plus rationnelle pour déterminer une combinaison satisfaisante du rapport eau/poudre et du dosage en superplastifiant que celle utilisée dans la méthode générale. Chaque paramètre est déterminé indépendamment, afin de minimiser le nombre de tests demandés. Ces tests ont montré que la relation entre l'étalement relatif Γ_m et la vitesse relative d'écoulement R_m est linéaire pour n'importe quelle valeur du dosage du superplastifiant (rapport Sp/P en masse) et pour n'importe quel rapport eau sur poudre (E/P en volume), et a la forme:

$$R_m = A \cdot \Gamma_m^{0,4} \quad (1.9)$$

1.7.2.3. Delft University (Denmark)

Travaillant avec des matériaux locaux, Pelova et al rapporté par [73], ont trouvé qu'il est possible d'augmenter le volume de gravier dans le béton à la hauteur de 60% du volume solide total, tout en limitant la dimension maximale des granulats D_{max} à 16 mm, et obtenir un béton autoplaçant. Le volume total de pâte est réduit de 10% par rapport à celui obtenu avec la méthode générale.

1.7.2.4. Méthode de Domone (U.C.L. Grande Bretagne)

Selon [73] Domone a proposé les modifications suivantes, sans utilisation d'agent de viscosité:

- Augmenter le volume du sable dans le mortier
- Introduire des ajouts minéraux dans la pâte de ciment
- Obtenir le rapport maximum eau/poudre, en utilisant le test d'étalement au cône sur mortier, de manière à assurer la résistance à la ségrégation.

- Déterminer le dosage en superplastifiant de la même manière que la méthode générale.
- Tester le mélange de béton à:
 - L'étalement: jusqu'à obtenir des valeurs entre 650 et 700 mm.
 - L'entonnoir en V: jusqu'à obtenir un temps d'écoulement entre 4 et 10 sec. (en utilisant des granulats de $D_{max} = 20$ mm) et un temps d'écoulement entre 2 et 4 sec. (en utilisant des granulats de $D_{max} = 10$ mm).

1.7.3. Formulation CBI (Suède)

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cement och Betong Institutet) [76,77] 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 ferrailés. 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 par différents auteurs [78,79,80] 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 :

$$R_b = \sum_i \frac{V_i}{V_{crit,i}} \quad (1.10)$$

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

$V_{crit,i}$: 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 [81]:

$$R_b = (1 - V_p) \cdot \sum_i \frac{y_i}{V_{crit,i}} \quad (1.11)$$

y_i : la proportion volumique de 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, en 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 H2/H1 doit rester au dessus de 0,8).

1.7.4. Méthode CBI modifiée

La principale modification et extension de la méthode CBI est apportée par Bui et al dans [82], qui ont proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Il s'agit d'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats. Leur méthode consiste à calculer l'épaisseur moyenne de la pâte autour des granulats du béton autoplaçant, grâce à une base de données importante de formulations de bétons [83]. L'espacement moyen entre les particules varie selon les auteurs entre 0,3 et 1 mm.

1.7.5. Formulation JSCE (Japon)

La JSCE (Japan Society of Civil Engineers) a proposé une procédure qui inclut la provision pour l'utilisation d'un agent de viscosité [73]. Le résultat du mélange de proportions dépend, non seulement de l'utilisation ou non d'un agent de viscosité, mais aussi de son type. Chacun des facteurs donnés ci-dessous (Tableau 1.4), a une valeur donnée à l'intérieur des limites représentées, et qui sont valables pour des bétons autoplaçants conçus avec les

dimensions maximales de granulats de 20 ou 25 mm. C'est la seule méthode qui traite des mélanges contenant un agent de viscosité.

Tableau 1.4 : Composition des BAP en fonction du type d'agent de viscosité

Facteur	Sans agent de viscosité	Type d'agent de viscosité			
		cellulose	Acrylic	Glycol	Polysaccharide
Gros granulat	0,30 – 0,32 m ³ /m ³ (note 1)				
Eau (note 2)	155 – 175 kg/m ³	170 – 180 kg/m ³			155 – 170 kg/m ³
Eau/Poudre (note 3)	0,28 – 0,37 (par masse)	Dépend des propriétés du béton à l'état durci			
Poudre (note 4)	0,16 – 0,19 m ³ /m ³	300 – 450 kg/m ³	400 – 450 kg/m ³	400 – 480 kg/m ³	> 0,13 m ³ /m ³
Air	Normalement 4,5 % (note 5)				
Sable	Par déduction des quantités de: gravier, eau, poudre et air				
Superplastifiant	A partir d'expériences précédentes et fiche technique du producteur				
Agent de viscosité		0,15 – 0,3% par poids d'eau)	3 – 5% (par poids d'eau)	2 – 3% (par poids d'eau)	0,05 % (par poids d'eau)

Note 1: peut être plus haut pour un faible degré d'autoplaçabilité

Note 2: si la durabilité n'est pas le vrai problème, cette valeur peut aller jusqu'à 190 Kg/m³

Note 3: si l'autoplaçabilité n'est pas atteinte, plus de poudre doit être ajoutée pour réduire le rapport Eau/Poudre

Note 4: ceci est calculé à partir de la quantité d'eau et du rapport eau/poudre.
les valeurs données sont typiques

Note 5: ceci dépend de la dimension maximale du granulat, la résistance demandée et des conditions environnementales

1.7.6. Formulation LCPC (France)

L'approche développée en France au LCPC par Sedran et De Larrard [84] est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. Un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité. 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. Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire.

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches, est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (Bétonlabpro 2) prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche [85,86], et permettant de déterminer des formulations

de différents types de bétons (bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, bétons autoplaçants). Pour un béton autoplaçant, les grandeurs exigées à l'état frais sont un étalement au cône d'Abrams supérieur à 600 mm, un seuil de cisaillement inférieur à 500 Pa, et une viscosité plastique comprise entre 100 et 200 Pa.s (grandeurs rhéologiques mesurées au BTHREOM). Ces critères correspondent selon les auteurs à un béton assez fluide et qui ne présente pas de ségrégation.

Une proportion de liant (ciment + addition) 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.

1.7.7. Formulation de l'Université de Sherbrooke (Canada)

Pour permettre aux mélanges de bétons autoplaçants à être optimisées pour n'importe quel ensemble particuliers de caractéristiques demandées, Khayat et al [87] considèrent qu'il est nécessaire de comprendre l'influence relative des paramètres du mélange et de ses interactions. A cette fin, ils ont mené une série de tests pour déterminer l'effet de variation des propriétés du mélange concernant des valeurs moyennes sur un certain nombre de propriétés d'un béton établi à partir d'un ensemble de matériaux, y compris l'agent de viscosité "welan gum".

Cinq paramètres ont été variés (le rapport eau/poudre; la quantité de poudre; la quantité de gros granulats; le dosage en agent de viscosité et enfin le dosage en superplastifiant). Une approche de calcul factoriel a été utilisée pour n'effectuer que 32 tests.

Chaque mélange était testé à: (l'étalement; seuil de cisaillement; la viscosité plastique; l'habilité au remplissage; temps d'écoulement à l'entonnoir en V; la résistance à la ségrégation et à la résistance à la compression).

Des modèles statistiques ont été obtenus à partir desquels chacune des propriétés mesurées pourrait être prévues à partir des proportions de mélange. Ceux-ci peuvent être utilisés pour:

- Optimiser les mélanges pour un nombre réduit d'essais
- Déterminer l'influence relative des variables clé des propriétés du BAP
- Etablir une compréhension de l'interaction entre les paramètres clé pour l'optimisation et le control de la qualité du mélange.

1.7.8. Autres formulations

1.7.8.1. Formulation de l'Institut de Recherche de Construction de l'Island (Iceland)

Nielsson et Wallevik [88], rapporté par RILEM [73], considèrent que les propriétés rhéologiques sont la nécessité dominante du BAP, et ont inclus les tests de rhéologie comme une partie essentielle et intégrale dans le processus de développement du mélange. Agents dispersants et superplastifiants sont établis en mesurant les constantes de Bingham pour mortiers. L'effet du dosage en superplastifiant et le changement des propriétés en fonction du temps sont déterminés.

De bons mélanges ont été développés avec un dosage en poudre de 450 – 460 kg/m³, et des rapports eau/poudre de 0,41 – 0,42. Le calcaire pourrait être utilisé pour réduire la quantité de ciment dans le mélange, et relativement de petites quantités d'un agent de viscosité (welan gum de 0,02 – 0,04% par masse d'eau) ont été incorporées pour compenser le déficit des fines dans le sable. Mais, les auteurs soulignent que ces mélanges ont utilisé des matériaux Islandais qui ont des caractéristiques différentes des matériaux utilisés ailleurs; en particulier le ciment contient: un dosage élevé en alcaline, un besoin en eau élevé, une perte d'ouvrabilité élevée et contient aussi 7% de microsilica et les granulats sont relativement du basalt poreux.

1.7.8.2. Formulation TFB (Suisse)

Jacobs et Hunkeler, rapporté par [73], ont développé des mélanges de béton autoplaçant en:

- Optimisant les propriétés rhéologiques du mortier comme mesurées dans un rhéomètre PC Viskomat. Des particules de 1 mm de dimension maximale ont été utilisées. Parmi les variables, le remplacement jusqu'à 30% du ciment par les cendres volantes et le laitier.
- Etablissement des caractéristiques de fluidité du béton avec le L-Box. Ils commentent que l'ouvrabilité du béton peut ne pas être toujours prévisible à

partir des propriétés rhéologiques du mortier, par exemple si la quantité du mortier dans le béton change.

1.8. Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état durci

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés.

Lors de son étude d'évaluation du retrait, fluage et module d'élasticité des BAP, Persson [89] a conclué que les valeurs de ces trois paramètres coïncident bien avec celles du béton vibré quand la résistance reste constante.

1.8.1. Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques ont été longtemps considérées comme les qualités essentielles pour un béton tout comme le BAP car elles généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elles sont directement reliées à la structure de la pâte de ciment hydraté. C'est la meilleure optimisation qui nous permet d'avoir un meilleur BAP avec des résistances qui peuvent aller de 60 à 100 MPa à 28 jours.

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

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [90]. Les particules fines d'un filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Différentes données ont été publiées [91,92] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes (Figure 1.13).

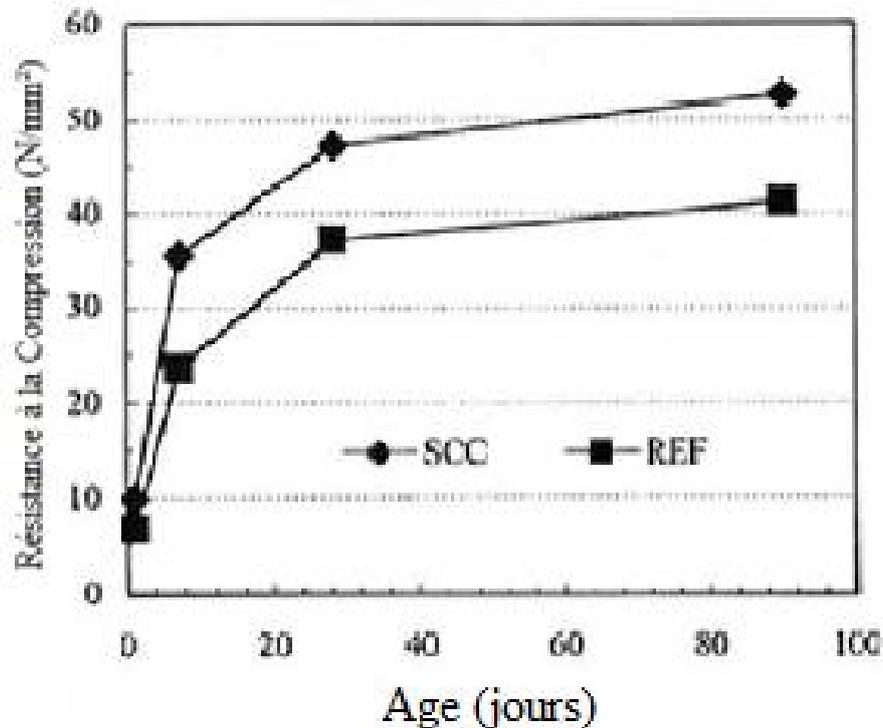


Figure 1.13 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [91]

De plus, certains auteurs [93] affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande.

L'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [94]. De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

Selon Klug et Holchemacher [95], les résistances mécaniques des BAP et des bétons vibrés sont similaires sous des conditions comparables, mais les BAP montrent des résistances plus élevées pour un même rapport Eau/Ciment.

1.8.1.1. Résistance à la compression

Un béton Autoplaçant avec un rapport E/L similaire, aura généralement une résistance légèrement plus élevée en comparaison à celle du béton ordinaire à cause du manque de vibration donnant une meilleure interface entre les agrégats et la pâte durcie [95].

1.8.1.2. Résistance à la traction

Pour une résistance à la compression donnée d'un BAP, la résistance à la traction peut être assumée à être la même que celle d'un béton ordinaire comme le volume de pâte (ciment + fines + eau) n'a aucun effet significatif sur la résistance à la traction [60].

Selon Klug [95] la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés, elle peut aller jusqu'à 40% ce qui implique qu'il y a nécessité de revoir la section minimale de ferrailage.

Selon Guneyisi et Gesoglu [96] la variation de la résistance à la traction d'un béton contenant du laitier est similaire à celle d'un béton sans laitier. En général la résistance à la traction est en baisse avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange, exception est faite pour les dosages en laitier à 50 et 60% dans le cas de 90 jours de cure dans l'eau.

Dans leur article sur les BAP légers à haute résistance, Choi et al [97] ont trouvé une relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction comparable à celle donnée par les règlements de Béton Armé. La relation proposée est : $f_s = 0.076f_{ck} + 0.5582$.

1.8.2. Module de Déformation Longitudinal

Comme la grande masse du volume de béton est représentée par les agrégats, le type et la quantité de ces derniers ainsi que les modules d'élasticité ont la plus grande influence sur le module d'élasticité du béton. En choisissant des agrégats ayant un module élevé augmentera le module d'élasticité du béton. Par contre, un béton ayant un grand volume de pâte pourrait affaiblir la valeur du module d'élasticité du béton. Parce que les bétons autoplaçants ont un grand volume de pâte, leurs modules d'élasticités peuvent être, en quelque sorte, plus faibles que ceux des bétons ordinaires.

Assié et al [98] ont trouvé que, d'une part et malgré qu'avec un rapport E/C élevé, les BAP présentaient une meilleure résistance à la compression que les bétons ordinaires, d'autre part la quantité plus élevée de pâte dans les BAP a généré une réduction dans le module d'élasticité par rapport au béton ordinaire.

Nassif et al [99] attestent que le module d'élasticité est proportionnel à la racine carrée de la résistance à la compression et que plus la résistance est élevée plus le module d'élasticité est élevé. Or ceci, d'après les auteurs, ne peut être valable que si le seul paramètre est le rapport eau/poudre. Le module d'élasticité des bétons à haute performance est influencé par les constituants du mélange. Ainsi à jeune âge le taux de gain du module d'élasticité est plus élevé que celui de la résistance quand le mélange comporte des additions minérales. Le module d'élasticité des BHP utilisant le laitier et la fumée de silice augmente avec l'âge, et le taux d'augmentation devient moindre à l'approche de 28 jours, plus encore l'addition des cendres volantes réduit le taux d'augmentation du module d'élasticité avec l'âge. Avant eux Persson [100] avait trouvé que le module d'élasticité, le fluage et le retrait du BAP ne diffèrent pas significativement de celles du béton ordinaire quand la résistance est constante.

Felekoglu et al [101] ont montré que les mélanges de BAP ont des modules d'élasticité faibles comparés à ceux du béton traditionnel. En général cette tendance peut être attribuée à la faible quantité de gros granulats et la grande quantité de la pâte.

1.8.3. Retraits

Plusieurs travaux ont comparé le retrait plastique du BAP et celui du béton vibré [15,102]. Gram et Piiparinen [102], ont observé des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons ordinaires (Figure 1.14).

Pour Turcry [15], l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons ordinaires (Figure 1.15).

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. Selon Song et al [103], le laitier remplit bien cette condition.

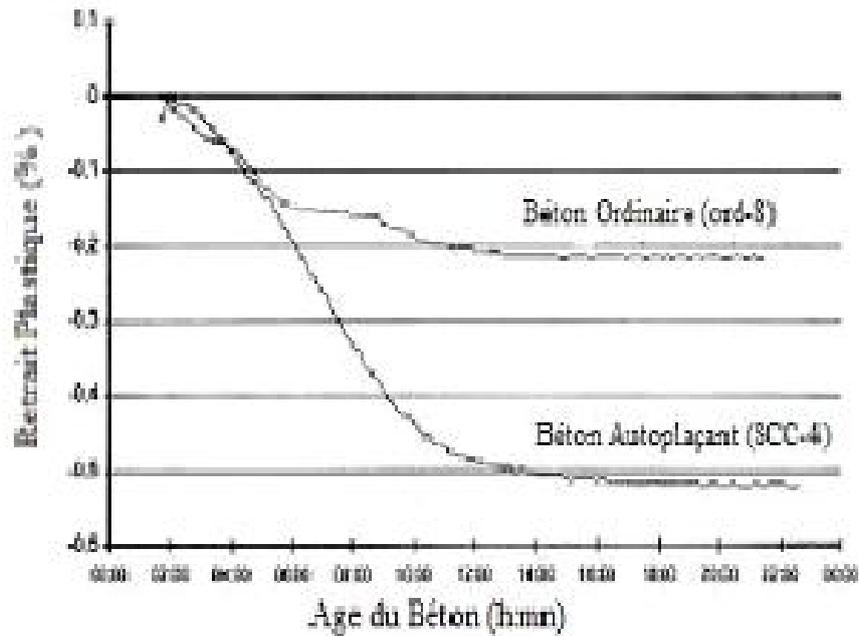


Figure 1.14 : Retrait plastique de BAP et de béton ordinaire [102]

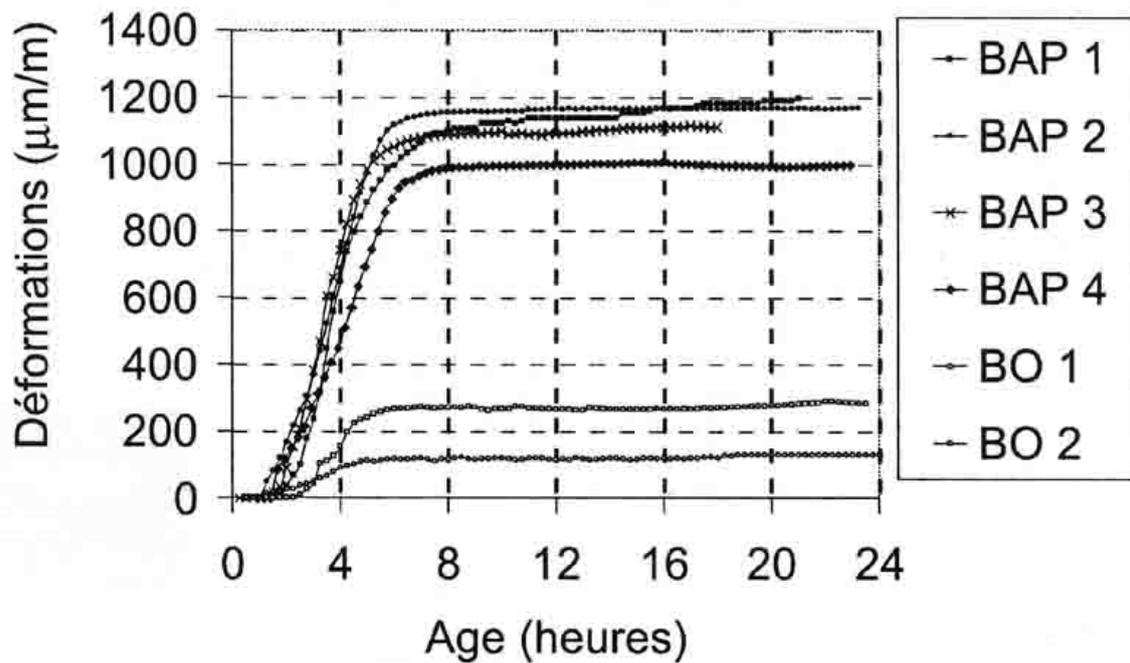


Figure 1.15 : Amplitudes maximales des BAP et Bétons ordinaires [15]

En ce qui concerne le retrait endogène qui est dû à l'hydratation, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés [104]. En effet, même si certains auteurs, Hu et Barbieri [105] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés, d'autres auteurs tels que Vieira et Bettencourt [106] et Pons et al [107]

contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton. D'autre part, Lee et al [108] mentionnent que le retrait endogène est plus important dans les BAP que dans les bétons ordinaires, en raison du retrait chimique élevé ainsi qu'aux fines pores dans les bétons au laitier.

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique est directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton est d'autant plus important que son rapport E/C est faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [107].

Les résultats disponibles de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs [105] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés. Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé. D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [89]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ (à 180 jours).

Sonebi et Bartos [92] ont observé des retraits de séchage des BAP moins importants (Figure 1.16) que ceux des bétons vibrés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). L'augmentation du volume de pâte pour une même quantité d'eau et la diminution du rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage [109].

Le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates [110]. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée.

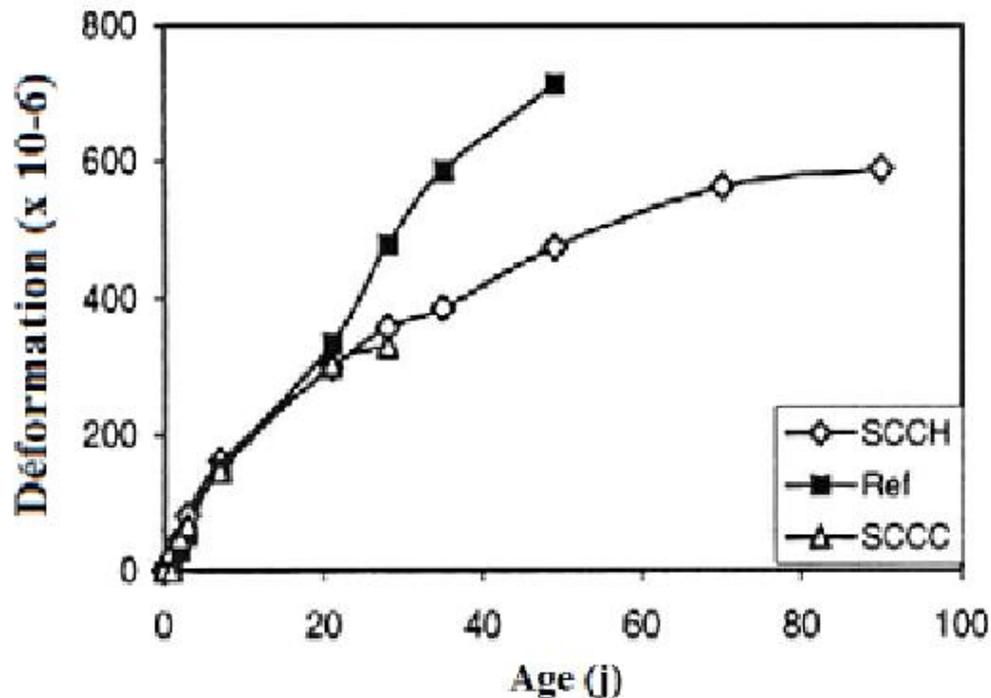


Figure 1.16 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant [92]

1.8.4. Fluage

D'après les résultats présentés par Proust [111], les comportements des bétons autoplaçants peuvent différer d'une formulation à l'autre. Globalement, les BAP subissent des déformations sous charge équivalentes ou légèrement supérieures à celles des bétons vibrés correspondants. Les vitesses de développement des déformations diffèrent peu d'un type de béton à l'autre. Ainsi, l'augmentation des déformations différées attendue en raison du volume de pâte plus important, ne semble pas avérée. D'après ces données, quel que soit le mode de conservation, les BAP possèdent des comportements différés sous charge semblables à ceux des bétons vibrés.

Cette concordance des comportements différés sous charge est confirmée par d'autres auteurs [112,106]. De plus, selon [100], le manque de différence significative entre le fluage des BAP et celui des bétons vibrés est valable pour une gamme de résistances étendue.

Ces différents résultats concernent des formulations de BAP proches de celles des bétons vibrés, notamment avec des quantités de ciment équivalentes et des rapports E/C voisins. L'influence du volume de pâte sur les déformations sous charge des bétons n'est pas réellement confirmée. Cette éventualité n'est pas exclue mais les comportements différés des BAP paraissent comparables à ceux des bétons vibrés.

Selon Song et al [103] l'effet de la finesse du laitier est clair sur le fluage. Ce dernier diminue pour les 28 premiers jours par rapport au béton vibré. Ceci est confirmé par Jianyong et Yan [113] qui stipulent que le fluage sera fortement réduit en utilisant un laitier ultrafin. Ils ajoutent aussi que dans les mêmes conditions, le fluage d'un béton à haute performance contenant un laitier ultrafin est beaucoup plus faible que celui d'un béton sans laitier. Ils ont comparé trois mélanges de béton à haute performance, le premier (concrete A) contenant que du ciment, le deuxième (concrete B) contenant 30% de laitier et le troisième (concrete C) contenant 30% de laitier et 10% de fumée de silice. Ils ont trouvé que le fluage des deux derniers mélanges est plus faible que celui du premier mélange (Figure 1.17).

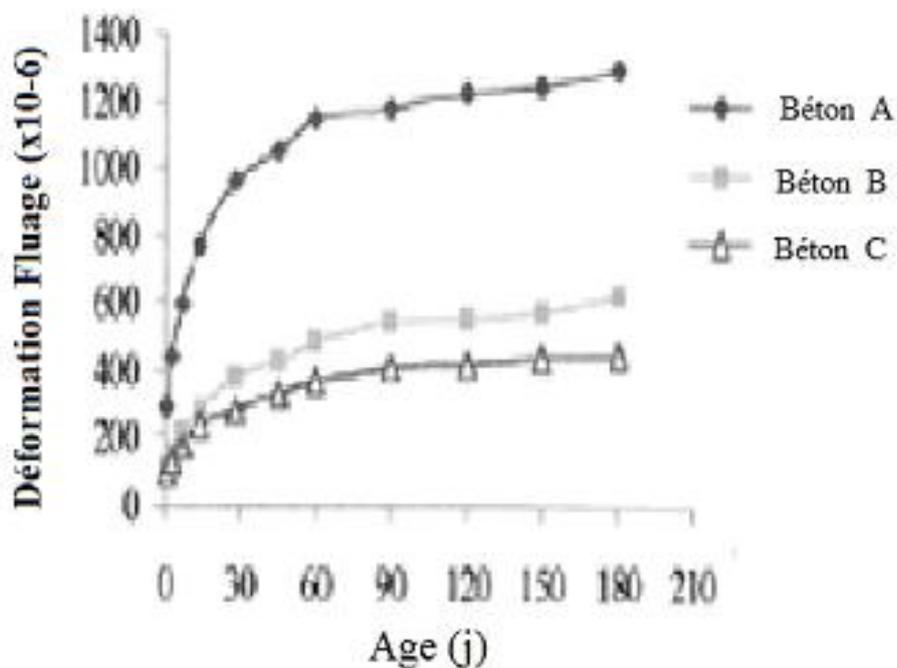


Figure 1.17 : Développement du Fluage du Béton [113]

1.8.5. Adhérence avec le ferrailage

Le béton armé est basé sur une adhérence effective entre le béton et les armatures. L'efficacité de l'adhérence est affectée par la position des bars et la qualité du béton. Un enrobage adéquat est nécessaire pour transférer proprement les contraintes d'adhérence entre l'acier et le béton. Une mauvaise adhérence est généralement le résultat de l'échec du béton à bien enrober l'acier durant la mise en place ou du ressuage et ségrégation du béton avant son durcissement. La fluidité et la cohésion du béton autoplaçant minimisent ces effets négatifs.

Sonebi et Bartos [92] ont trouvé que la contrainte d'adhérence dans un BAP est entre 16 et 40% plus élevée que dans un béton ordinaire. Mieux encore, Chan et al [114] ont trouvé que, sans vibration, la contrainte d'adhérence dans un BAP est double de celle dans un béton ordinaire, et elle est meilleure que celle dans un béton à haute performance même vibré. Récemment Valcuende et Parra [115] ont confirmé cependant le meilleur comportement du BAP en adhérence que le béton ordinaire.

Domone [40] a trouvé que la contrainte d'adhérence des BAP est très similaire à celle des bétons ordinaires.

1.8.6. Résistance au feu

Le béton n'est pas combustible et ne supporte pas l'étalement des flammes. Il ne produit pas de fumée, de gaz toxiques ni d'émissions quand il est exposé au feu. Le béton a un faible seuil de transfert de chaleur et retient la majorité de sa résistance. D'après le rapport de RILEM en 2008 sur la durabilité des BAP [116], la résistance au feu des bétons autoplaçants est similaire à celle des bétons ordinaires. A cause de la faible perméabilité du BAP la résistance au feu peut être considérable. Selon Persson [117], l'utilisation des fibres polypropylène a été très bénéfique aux BAP car ils contiennent des pores qui permettent l'emprisonnement des fumées.

1.8.7. Corrosion des armatures

Cheng et al [118] ont effectué des essais sur la corrosion des armatures dans des mélanges de béton contenant du laitier et ils ont trouvé que ce dernier diminue les pores dans le mélange, produit un mélange dense, diminue les risques de fissuration et par conséquent réduit le risque de corrosion dans les armatures. Selon Pal et al [119] l'augmentation de la teneur en laitier dans le béton diminue la quantité de corrosion dans ce dernier. Yeau et Kim [120] ont trouvé aussi qu'une grande résistance à la corrosion peut être atteinte avec une grande teneur en laitier.

Selon Hou et al [121] l'introduction du laitier dans le mélange de béton assure une faible perméabilité ce qui assure une forte résistance à la corrosion des armatures.

Très récemment Hassan et al [122] ont trouvé qu'en coulant une poutre armée en béton autoplaçant et une autre en béton ordinaire, à échelle réelle, la résistance à la corrosion a été plus élevée dans le cas du BAP que pour le béton ordinaire. Par contre la propagation des fissures a été plus facile et plus étendue dans le cas du BAP. La poutre coulée en BAP a montré une dégradation de l'enrobage, probablement dû au faible volume de gros granulats

dans le mélange en BAP. Il a été constaté aussi une certaine non-uniformité du BAP le long de la poutre tout en s'éloignant de l'extrémité où le coulage est réalisé et par conséquent ils ont proposé que le point de coulage soit mobile le long de la poutre.

1.9. Durabilité d'un BAP

La durabilité d'une structure en béton est associée étroitement à sa perméabilité. En pratique, la durabilité dépend du choix des matériaux, de la composition du béton, ainsi que du degré de supervision durant la mise en place, la compaction et la cure du béton.

Le déficit de compaction dû aux difficultés de vibration dans des espaces étroits entre les bars et le coffrage a été reconnu comme étant un facteur clé de faible durabilité pour des structures en béton exposées à des environnements agressifs. Le surpasser était l'une des raisons essentielles pour le développement des bétons autoplaçants au Japon.

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

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

Les spécificités de composition des BAP ne semblent pas permettre de tirer un premier commentaire quant à une perméabilité différente de celle des bétons vibrés. Le volume de pâte plus important peut a priori être un handicap pour ces bétons mais l'utilisation d'addition minérale est susceptible d'améliorer cette propriété : la densification de la matrice cimentaire qu'elle engendre peut éventuellement diminuer la perméabilité du béton.

Assié et al [98] ont trouvé qu'il n'y a pas une différence significative dans les propriétés physico-chimiques (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlore, absorption

d'eau et carbonations par le nitrate d'ammonium) pour les deux types de béton, BAP et ordinaire.

1.9.1. Perméabilité à l'eau

Selon Hou et al [121] l'invasion de substances nocives dans le béton est une question de fluidité. Ceci est gouverné par la loi de Darcy. La perméabilité à l'eau est étroitement liée aux dimensions des pores dans le mélange, plus les pores sont larges plus grande est la perméabilité. Si le rapport Eau/Ciment est en dessous de 0,32 et l'hydratation est complète, il n'y aura pas de pores capillaires. Pour une cure de 90 jours, plus le rapport E/C est faible plus la perméabilité du béton est faible. Pour les bétons contenant du laitier, les pores capillaires (diamètre supérieure à 100 Å) sont transformées en pores gellives (diamètre inférieure à 100 Å), ceci est dû à la réaction pouzzolanique qui améliore la densification du béton.

1.9.2. Absorption d'Eau

L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). En pratique, l'absorption se mesure en faisant sécher une éprouvette de béton, à masse constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de sa masse (exprimée en %) de la masse sèche. Une autre méthode pour évaluer l'absorption d'eau consiste à mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire à l'intérieur d'une éprouvette de béton. Cet essai permet d'exprimer la vitesse d'absorption par remontée capillaire.

L'absorptivité est influencée en premier lieu par le rapport E/C. D'autre part, plus le taux d'humidité du béton est élevé, plus la valeur mesurée d'absorptivité est faible. Comme pour les propriétés de transfert déjà mentionnées (perméabilité et diffusion), la formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau différente de celles des bétons vibrés.

Cependant, d'autres résultats [123] démontrent que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés (Figure 1.18) et elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes.

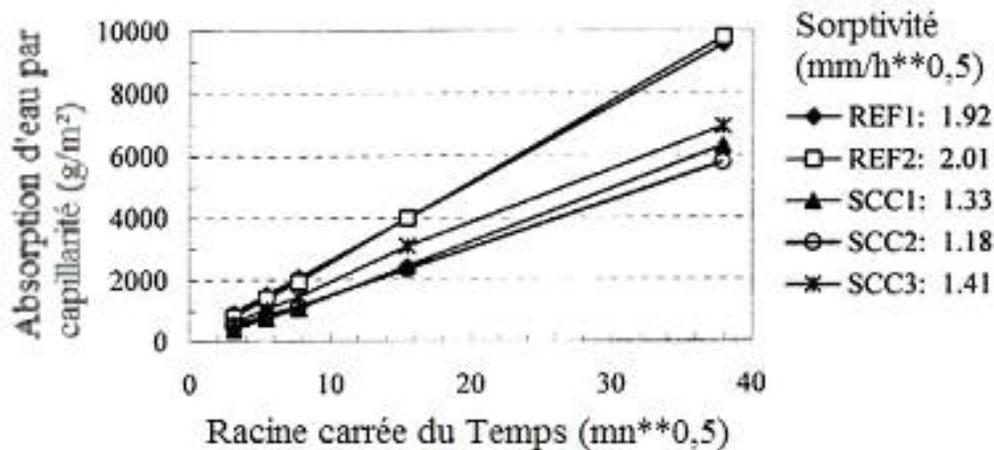


Figure 1.18 : Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés selon [123]

Selon De Schutter et Audenaert [124], l'absorption d'eau par immersion n'est pas un paramètre fiable pour l'estimation de la résistance contre la carbonatation et la migration de chlorures. L'absorption d'eau par immersion donne une idée globale de la porosité totale du béton. Malheureusement, l'absorption d'eau par immersion n'est pas fortement corrélée avec la perméabilité ; celle-ci est un paramètre plus important pour la durabilité.

Selon Guneyisi et Gesoglu [96], 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 laitier et sans, deviennent plus significatives à cause de la méthode de cure après 28 jours et sont remarquablement plus faible pour le béton au laitier. D'autres par et contrairement au laitier, Dinakar et al [125] ont montré que les BAP avec dosage élevé en cendres volantes accusent une grande absorption d'eau.

1.9.3. Perméabilité au Gaz

La perméabilité au gaz est influencée par la quantité d'eau interstitielle, du rapport E/C et de la pression d'essai [126]. Certains travaux [127] ont en effet montré que les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent aux BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés de même rapport E/C. La porosité de ces BAP, en particulier celle de l'auréole de transition, est significativement plus faible que celle des bétons vibrés. D'après ces données, il résulte de ces observations une amélioration des propriétés de transfert

mesurées, comme la perméabilité aux gaz par exemple, et une meilleure durabilité des ces bétons.

D'autres résultats [123,128] relatifs à la durabilité des BAP montrent que leur perméabilité à l'oxygène est moindre que celle des bétons vibrés. 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 dans les BAP. L'influence d'autres paramètres distinguant les BAP des bétons vibrés n'a pas été clairement élucidée. Le volume de pâte, par exemple, n'entre pas dans les éléments de comparaison de la perméabilité de deux types de béton.

D'après Assié dans sa thèse [129] la formulation de BAP est plus résistante à la pénétration d'un gaz tel que l'oxygène que la formulation de béton vibré correspondante, ainsi la perméabilité au gaz pour un BAP60 est plus faible que celle d'un béton vibré BV60 (voir figure 1.19)

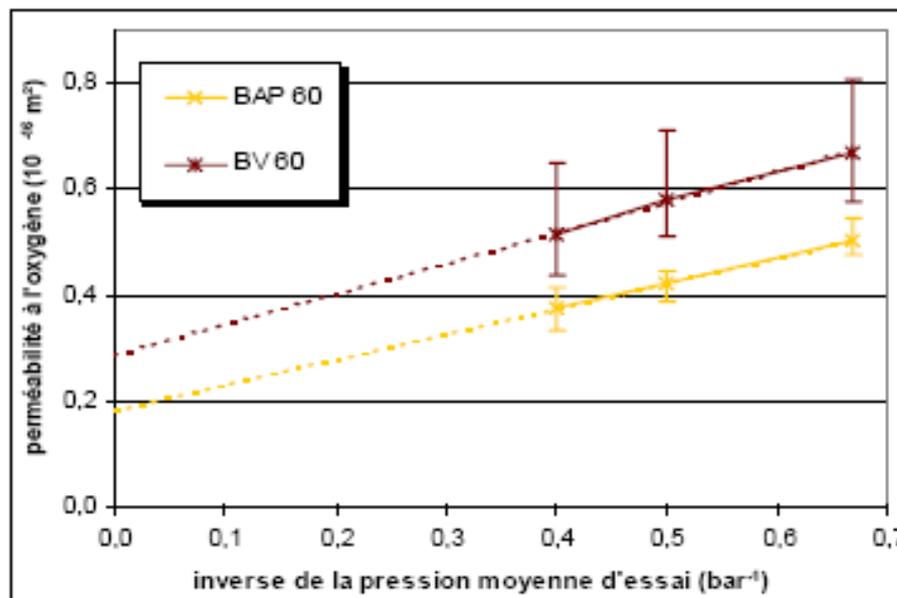


Figure 1.19 : Perméabilité à l'état sec des formulations de BHP [129]

1.9.4. Perméabilité aux ions Chlore

Les ions chlore peuvent provenir de diverses sources extérieures (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles) et pénétrer dans le béton par diffusion (et/ou absorption). Lorsque ceux-ci 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

(basique) des armatures. Il y a dépassivation de l'acier et le phénomène de corrosion peut alors commencer. Dans ce cas de figure, la durabilité du béton armé dépend fortement de la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs (même s'ils ne dégradent pratiquement pas le béton lui-même).

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

Les différentes comparaisons publiées sur la diffusion des ions Chlore entre les BAP et les bétons ne permettent pas d'en déduire une tendance générale. Certains auteurs [130] ont évalué le comportement de bétons autoplaçants et de bétons vibrés soumis à un essai de migration des ions Chlore sous un champ électrique. Malgré un rapport E/C plus faible (0,4 contre 0,5 pour le béton vibré), le BAP s'est avéré moins résistant à la migration des ions chlore. Les coefficients de diffusion du BAP, calculés à partir de ces essais, sont 2 à 3 fois supérieurs à ceux du béton vibré (31 à 56.10⁻¹² m²/s au lieu de 15 à 18.10⁻¹² m²/s). Selon ces auteurs, ces faibles performances pourraient être attribuées à une mauvaise dispersion de l'addition calcaire.

D'autres auteurs observent expérimentalement que les BAP possèdent des coefficients de diffusion des ions chlore équivalents [131], sinon meilleurs que les bétons vibrés.

D'après Zhu et al [123], la résistance à la pénétration des ions chlore est très influencée par le type d'addition minérale employé dans le béton. Les bétons formulés avec (BAP SCC1) ou sans filler calcaire (BAP SCC3 et 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 1.20). Ces auteurs indiquent également que l'emploi de cendres volantes diminue considérablement le coefficient de migration de ces bétons.

Toutefois, pas mal d'auteurs estiment que les résultats indiquant des comportements équivalents des BAP et des bétons vibrés vis-à-vis du mécanisme de diffusion sont les plus courants [112,132-134] (Figure 1.21).

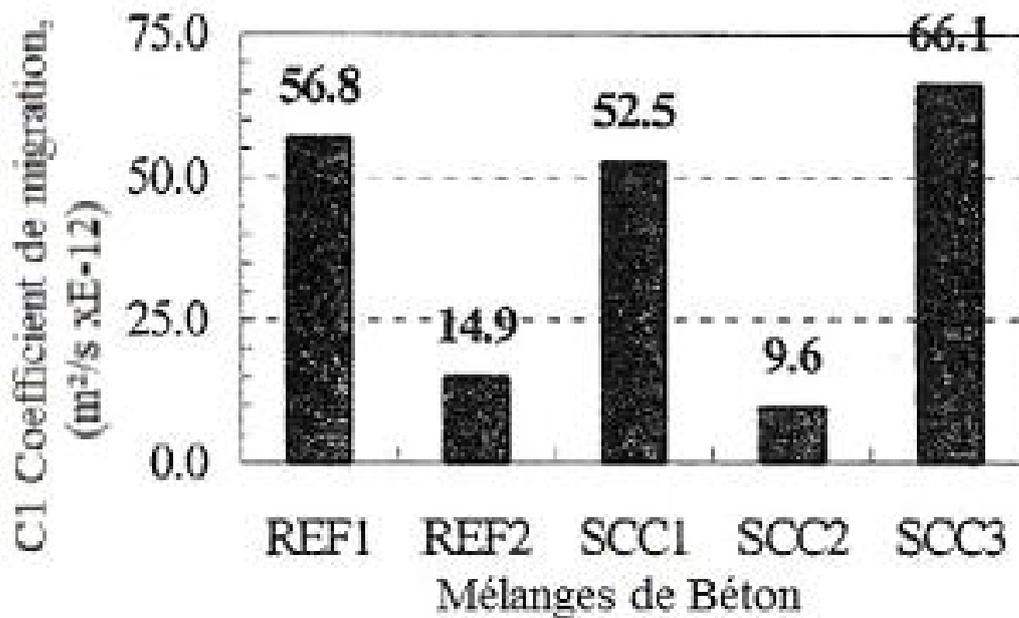


Figure 1.20 : Coefficient de migration des ions chlore de trois BAP (SCC) et de deux bétons vibrés correspondants [123]

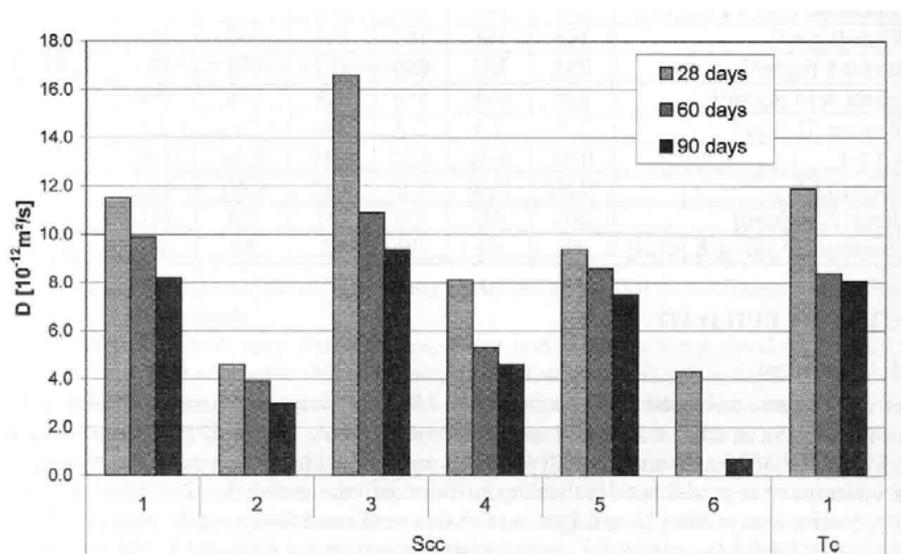


Figure 1.21 : Coefficients de diffusion de BAP (SCC) et de bétons vibrés (Tc) [133]

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de la figure 1.20, en prenant le BAP SCC1 comme référence, la quantité de ciment est moins importante dans le BAP SCC3 ce qui engendre une augmentation du rapport E/C et conduit à une structure poreuse plus grossière. Ainsi, le coefficient de diffusion est diminué quel que soit l'âge de l'essai. Dans le BAP

SCC4, la quantité de ciment plus importante a conduit cette fois-ci à un coefficient de diffusion plus faible que le BAP SCC1. Ceci prouve bien l'influence importante du rapport E/C sur le coefficient de diffusion des bétons.

En ce qui concerne la comparaison BAP - béton vibré, ces résultats montrent que le béton vibré (TC) possède un coefficient de diffusion équivalent à celui du BAP pris comme référence. Enfin, le BAP formulé avec des cendres volantes (SCC6) dispose d'un coefficient de diffusion très faible en raison de sa structure poreuse très dense.

Selon Guneyisi et Gesoglu [96] les bétons au laitier, surtout dans le cas de fort dosage en laitier (plus que 50%), ont une perméabilité aux ions chlore remarquablement faible par rapport aux bétons sans laitier. Très récemment Güneyisi et al [135] ont confirmé l'avantage du laitier dans la réduction de la perméabilité des ions chlore surtout dans les conditions de cures à long terme. Des résultats similaires ont été observés pour les BAP contenant un fort dosage en cendres volantes selon Dinakar et al [125].

1.9.5. Gel-Dégel des BAP

Selon Ramachandran et al [136] L'action de gel du béton est définie comme le gel et dégel de l'humidité dans les matériaux constituant le béton. Une bonne résistance au gel peut être obtenue avec un bon choix et proportionnement des matériaux. En plus du rapport E/C, la qualité des agrégats et la quantité d'air dans le mélange, la résistance du gel dépend des conditions de cure. Un béton sec supporte bien le gel/dégel, par contre un béton saturé d'eau peut être sévèrement endommagé par quelques cycles de gel/dégel. En général, la meilleure approche pour la prévention contre l'attaque du gel dans le béton est l'utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air. Toujours selon les mêmes auteurs, l'essai le plus largement utilisé pour déterminer la résistance au gel/dégel du béton est l'essai « ASTM C 666 » (résistance du béton au gel/dégel rapide), qui comporte deux procédures A et B, pour la procédure A, le gel et le dégel se passent avec un spécimen entouré d'eau, tandis que pour la procédure B, le spécimen est gelé dans l'air et dégelé dans de l'eau.

Les bétons à haute performance, du fait notamment de leur compacité accrue qui les rend moins perméables et leurs caractéristiques à la traction plus élevées, présentent une très bonne résistance aux cycles de gel/dégel, tenue qui peut encore être améliorée par adjonction d'un entraîneur d'air [137].

Khayat et Assaad [138] ont trouvé que l'addition d'un adjuvant haut réducteur d'eau peut déstabiliser les bulles d'air entraînées dans le béton durant le transport, ce qui peut

affecter le système des vides, mais malgré ça une résistance au gel/dégel peut toujours être obtenue avec des adjuvants haut réducteurs d'eau. Les résultats de leurs essais ont montré que les caractéristiques des poches d'air d'un BAP peuvent être similaires à celles d'un béton vibré. Ils ajoutent aussi qu'en général une plus grande stabilité des poches d'air est obtenue quand le mélange du BAP contient une plus grande proportion de pâte de ciment et un plus faible rapport eau/ciment, sauf si un agent de viscosité est incorporé au mélange.

Persson [139] a trouvé que le BAP exhibe mieux la résistance interne du Gel que le béton ordinaire, et qu'un BAP contenant 6% d'air résiste mieux au gel qu'un BAP contenant 8% d'air. Hans-Erik et Pentti [140] ont aussi confirmé que le BAP a une résistance au gel meilleure que celle d'un béton ordinaire.

Lang et Geiseler [141] ont montré que contrairement au ciment portland les ciments au laitier ont une grande résistance au gel-dégel. Bassuoni et Nehdi [43] ont trouvé que l'introduction d'un entraîneur d'air dans un BAP est très nécessaire surtout dans un climat froid, pour protéger le mélange exposé à des cycles de gel/dégel.

1.10. Applications dans le monde et en Algérie

1.10.1. Dans le monde

Les chantiers, où la solution BAP a été retenue, montrent l'intérêt de ces bétons. Les motivations de ce choix les plus couramment rencontrées sont la facilité de mise en œuvre, la réduction des délais et la qualité des parements. On peut citer quelques ouvrages réalisés en BAP en France:

En France

- Les voiles de 16 m de hauteur sur 30 cm d'épaisseur de la salle principale du cinéma d'une Bibliothèque à Paris
- Les massifs d'éoliennes à Plougras, comportant une densité d'armature importante
- Le barrage Belbezet, nécessitant une consolidation des parois rocheuses et l'obstruction de cavités.

L'expérience japonaise a mis en évidence la faisabilité de ces bétons sur des chantiers importants tels que :

- le pont Kiba Park, où 650 m³ de béton autonivelant ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPa;
- le pont Akashi Kaikyo achevé en 1998 est le plus long pont suspendu au monde (3910 m), où 390 000 m³ de béton autonivelant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration;
- le bâtiment Landmark Tower, où un béton autonivelant d'excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune;
- le stade de Fukuoka, où 10 000 m³ de béton autonivelant ont été utilisés pour des sections fortement armées et de formes compliquées.

Le tableau 1.5 donné par Mechaymech [142] montre un ensemble d'ouvrages réalisés en béton autoplaçant avec des spécifications telles que :

- le diamètre maximal D_{\max} de granulats utilisé
- l'agent de viscosité utilisé
- le résultat de l'essai d'étalement du BAP utilisé
- la valeur de la Résistance à 28 jours obtenue
- la quantité en volume du BAP utilisée
- le type de mise en place

Le tableau 1.6 donné toujours par Mechaymech [142] montre d'autres ouvrages en donnant quelques éléments d'information sur la formule utilisée, les propriétés du béton ainsi que les avantages d'exécution pour chaque ouvrage.

Tableau 1.5 : Exemples d'Application des BAP (selon ses caractéristiques) [142]

Type de projet	D _{max} (mm)	Agent de viscosité	Étalement (mm)	Résistance à 28 j (MPa)	Volume (m ³)	Type de mise en place
Immeuble de vingt étages. Structure mixte acier avec noyau central en béton. L'accès au coffrage et le fort ferrailage ne permettent pas la vibration.	20	oui	675	53	1500	Pompage
Immeuble de 70 étages avec des colonnes métalliques remplies de béton allant jusqu'à 40 m de hauteur et comprenant jusqu'à 16 diaphragmes avec un diamètre d'ouverture de 18 cm.	20	oui	710	44	880	Le béton est pompé par le bas des colonnes.
Pile d'un pont le hauban construit avec des coffrages récupérés préfabriqués en béton. Le ferrailage important nécessitait l'utilisation d'un BAP.	20	oui	680	54	8000	Déversement à partir d'une benne à béton.
Massif d'ancrage du plus long pont suspendu (Akashi Kaikyo). La densité de ferrailage et la présence de nombreuses installations temporaires rendaient difficile la vibration.	40	non	600	36	120 000	Pompage
Mur de 8 m de haut et 20 cm d'épaisseur. La densité de ferrailage rendait difficile l'insertion du tuyau de pompage dans le coffrage.	20	non	550	36	80	Déversement du haut des coffrages (8 m).

Tableau 1.6 : Exemples d'Application du BAP (selon la formulation utilisée) [142]

Ouvrage	Élément de construction	Formule	Propriétés du béton	Avantages
Pont Akashi, Japon (le plus long pont haubadé)	Culée d'ancrage 0,39 million m ³ du BAP	Ciment et filler calcaire diamètre maximum des granulats ≤ 40 mm		- Durée des travaux réduite de 2,5 à 2 ans
Construction de ponts en Suède	Mode de construction standard de l'office des routes de Suède	Ciment et filler calcaire	E/C < 0,40, béton résistant au gel et aux sels de déglacage à résistance élevée à la pénétration de chlorures.	- Durabilité améliorée grâce à la qualité uniforme du béton. - Construction plus mince grâce à la résistance élevée du béton.
Conteneur de gaz liquide en précontrainte au Japon	Diamètre : 84,2 m Hauteur : 38,4 m Épaisseur : 0,8 m 12 000 m ³ BAP 10 monte-charges de 4,4 m de hauteur	Ciment : 515 kg/m ³ Filler calcaire : 70 kg/m ³ Granulats : 0,20 mm	E/L : 0,33 4,5% volume d'air	- Nombre de monte-charges réduit de 14 à 10. - Nombre d'ouvriers spécialisés réduit de 150 à 50 - Durée des travaux réduite de 22 à 18 mois.
Millenium Tower, Vienne (bâtiment administratif de 50 étages)	Surface de base : env. 1000 m ² Hauteur : 185m	BAP transporté par grue pour le remplissage de colonnes porteuses en acier de 6 m de hauteur		-Réalisation d'éléments de construction de géométrie parfaite -Plus grande durabilité (vides évités) -Économie sur les coûts de main-d'œuvre -Bétonnage sans bruit
Centre de la culture de Meudon	Béton apparent BAP d'une construction en béton armé composé de béton prêt à l'emploi et d'éléments préfabriqués	Ciment blanc et nanosilice		-Surface répondante à des hautes exigences (peu de bullage) -Plus grande durabilité -Économie sur les coûts de main-d'œuvre
Binz-center 2000, Zurich	Cloisons (8,00x4,50m) Mises en place ultérieurement sous dalle en béton armé existante	Ciment : 300 – 350 kg/m ³ Cendres volantes : 150 – 100 kg/m ³	Béton frais pompable sur 30 m	Plus avantageux que des murs en brique silico-calcaire
Tunnel Schwimmbad, Reinach	Remise en état des parois et piliers	CEM 1 : 325 kg/m ³ C.V. : 100 kg/m ³	E/L : 0,48 4,6 % vol. d'air Béton résistant au gel	-Durabilité augmentée grâce à la qualité uniforme du béton -Surface du béton avec peu de défauts -réduction de la durée des travaux.
Uno city Center, Vienne	Consolidation de sous-poutres	CEM 1 : 300 kg/m ³ Laitier de haut fourneau : 200 kg/m ³ Granulats : 0/16 mm	E/C : 0,50 E/L : 0,40	Élément de construction de géométrie parfaite avec teneur élevée en fers d'armature -Durabilité augmentée
Pont de la Rempen à Vorderthal (SZ)	Remise en état du pont routier en béton armé datant de 1923	Béton pompé : CEM II : 450 kg/m ³ Granulats : 0/16 mm	Béton frais : E/L : 0,38-0,40 ; air : 4-6 % Béton durci : Résistance à la compression à 28 j. : 45 – 50 N/mm ²	

1.10.2. Cas de l'Algérie

A notre connaissance et à ce jour aucun ouvrage n'a été construit en utilisant le BAP sachant qu'au niveau de la réglementation ce dernier n'est pas encore normalisé. Néanmoins, il peut y avoir quelques cas de construction où le béton adjuvanté a été utilisé en introduisant soit des plastifiants soit des superplastifiants mais pas pour autant que ça soit du béton autoplaçant.

1.11. Conclusion

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel, mais leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière.

L'essai de référence pour caractériser la fluidité des BAP est l'essai au cône d'Abrams. La mesure d'étalement permet de s'assurer de la capacité du matériau à s'écouler sans obstacles. Elle n'est cependant pas suffisante pour appréhender le comportement du matériau. Une étude rhéologique des paramètres intrinsèques est nécessaire.

Les formules de BAP très fluides et riches en pâte permettent d'obtenir, en l'absence de ressuage, de bonnes qualités de parement. Cependant, ces qualités ne sont pas garanties d'une absence de ségrégation. Il est donc nécessaire de s'assurer, en amont, de la stabilité du matériau frais afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques mécaniques de la structure finale.

Par ailleurs, la fluidité et la stabilité sont des propriétés apparemment contradictoires. La formulation des BAP est donc relativement complexe et nécessite de trouver un bon compromis. Or des variations de teneurs en eau peuvent perturber l'équilibre obtenu. Ainsi, des agents viscosants peuvent être employés pour augmenter la robustesse des BAP.

Différentes méthodes de formulation ont été proposées à partir d'une optimisation du mortier, une optimisation de la quantité de pâte ou une optimisation du squelette granulaire. On signale ici que les approches de formulation des bétons autoplaçants n'ont pas été développées pour des BAP contenant des agents de viscosité. Cet adjuvant peut en effet modifier les propriétés d'écoulement du béton, et entraîne le changement des dosages des autres constituants des BAP.

De cette lecture rapide de la littérature sur les BAP, on peut sortir avec une conclusion donnant les points essentiels de ce qu'il faut retenir. Le premier point est sans doute que les

BAP nécessitent un volume important de pâte comportant une quantité non négligeable de fines. La diversité des formulations, toutes basées sur l'expérimentation, et convergeant vers un seul but, la satisfaction des trois caractéristiques du BAP à savoir : la capacité au remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation. L'étude rhéologique est devenue un point incontournable et plus que nécessaire. Les essais d'ouvrabilité, malgré non encore normalisés, sont dorés et déjà connus et bénéficient d'une acceptation unanime.

La diversité dans la qualité des matériaux utilisés ne permet pas d'admettre une méthode universelle pour la fabrication d'un BAP. Il n'est pas injuste de dire qu'il y a autant de formulation que de pays ou région dans le monde. Le but de ce projet est justement d'adopter une méthode de formulation, pour la fabrication d'un bon BAP, tout en tenant en considération les particularités des matériaux locaux.

CHAPITRE 2

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET FORMULATIONS ADOPTÉES

CHAPITRE 2

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET FORMULATIONS ADOPTÉES

2.1 Généralités

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

Dans une première partie on explicitera les différents matériaux qui ont été utilisés dans le cadre de ce travail tout en justifiant leur utilité ainsi que leurs caractéristiques et différentes propriétés. Dans une seconde partie, on exposera la formulation qui a été choisie pour réaliser les différents essais tant pour le mortier que pour le béton.

2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

2.2.1 Le ciment

Le type de ciment utilisé est un ciment du type CPA CEM I 42.5, avec une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa., une masse spécifique de 3,1 g/cm³ et une surface spécifique de Blaine (SSB) de 3000 cm²/g. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le tableau 2.1.

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

Composition chimique (%)									
CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	PAF	RI
65,70	21,70	5,20	2,80	0,80	0,70	0,80	0,50	1,4	0,4
Composition minéralogique (%)									
C₃S		C₂S		C₃A		C₄AF			
59,2		23,3		6,1		11,4			

2.2.2 Le Laitier

Le laitier de haut fourneau provient du complexe sidérurgique d'El-Hadjar. Il est fourni sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm, de couleur jaune clair.

Pour le broyage du laitier, nous avons utilisé un broyeur à boulets (Figure 2.1) de vitesse de 56 tr/min (laboratoire du CETIM à Boumerdès). Nous avons fixé le temps nécessaire pour avoir la finesse voulue à 60 min, puis le laitier a été tamisé en utilisant un tamis 63 μm . La surface spécifique obtenue est de 3500 cm^2/g , la masse spécifique est de 2.9 g/cm^3 .



Figure 2.1 : Broyeur à boulet utilisé

Selon Öner et al [143], traditionnellement le clinker et le laitier sont broyés ensemble ce qui ne donne pas la possibilité de contrôler le degré de finesse de chaque composant et limite la participation du laitier dans les réactions d'hydratation et réduit ainsi la résistance. Le mieux serait de broyer le clinker et le laitier séparément et de les mélanger dans des proportions de manière à pouvoir jouer sur les dosages en laitier selon les proportions désirées. Amrane et Kenai [144] ont utilisé le même laitier d'El-Hadjar. Ils l'ont broyé, à une finesse comparable à celle du ciment, et ont trouvé des résistances à la compression, à 28 jours, comparables à celles d'un béton sans laitier. Par conséquent, un broyage séparé a été adopté dans le cadre de cette étude.

D'après Kateb dans son mémoire [145], l'utilisation du laitier apporte les avantages suivants :

- Leurs utilisations avec du ciment rendent le temps de prise un peu plus long que les ciments Portland seuls.
- Les résistances aux premiers jours sont inférieures à celles des ciments seuls, mais elles se rattrapent souvent au bout de 7 jours

- Les chaleurs dégagées, surtout aux jeunes âges, sont faibles, ce qui présente un avantage pour leurs utilisations dans les ouvrages en grande masse.
- Ils permettent une résistance notable à l'action des eaux agressives

D'après Boukendakdji M. [146], la qualité du laitier est appréciée par son degré d'hydraulicité M_b :

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

Si le degré d'hydraulicité est supérieur à 1, le laitier sera suffisamment réactif. Wainwright et Rey [147] confirment cela en déclarant qu'une des mesures de la réactivité du laitier est son module de basicité, plus le module est élevé plus le laitier est réactif. Ils ajoutent également que plus le laitier est fin plus il est réactif et par conséquent il y aura moins de ressuage. Dans notre cas, $M_b = 1.319$.

Les différentes caractéristiques du laitier sont présentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Caractéristiques chimiques et physico-mécaniques du Laitier d'El Hadjar

Composition chimique									
Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	Mg O	MnO	K ₂ O	S O ₃	TiO ₂	total
40,10	6,00	2,00	42.20	4,70	2,60	1,20	0,15	1,20	101,15
Caractéristiques physico-mécaniques									
Densité	Pouzzolanicité	Surface Spécifique			Résistance Mécanique (granulat)				
0.80	80%	3500 cm ² /g			45 kg/cm ²				

Bougara et al [148] ont montré qu'une augmentation en finesse du laitier d'El-Hadjar augmentera le développement de la résistance et que la finesse du laitier doit être plus grande que celle du ciment pour pouvoir améliorer la performance de cette dernière.

Selon Behim et al [149], le laitier d'El-Hadjar est actif selon sa finesse et à faibles pourcentages de substitution n'excédant pas 30%. Pour cela nous avons jugé utile ne pas dépasser les 25% de substitution.

2.2.3 Les Granulats

2.2.3.1 Le Sable

Le sable utilisé est un sable roulé ayant un module de finesse de 3.32 et un équivalent de sable de 82.84%, de taille granulaire 0/5, de densité absolue de 2,61, de densité apparente de 1,45 et de coefficient d'absorption de 1,2% provenant de la région de Baghlia.

2.2.3.2 Le Gravier

Le gravier utilisé est un gravier composé de deux classes granulaires : la classe 3/8 et la classe 8/15. Nous avons jugé utile de favoriser la quantité de la classe 8/15 par rapport à celle de la classe 3/8 pour assurer un meilleur volume de pâte couvrant les granulats. Les caractéristiques principales des graviers utilisés sont présentées dans le tableau 2.3. La figure 2.2 présente les courbes granulométriques du sable et des graviers.

Tableau 2.3 : Caractéristiques des granulats

Granulats	Classe granulaire (mm)	Densité absolue	Densité apparente	Coefficient d'absorption
Gravier	3/8	2.59	1.32	1%
	8/15	2.56	1.26	1%

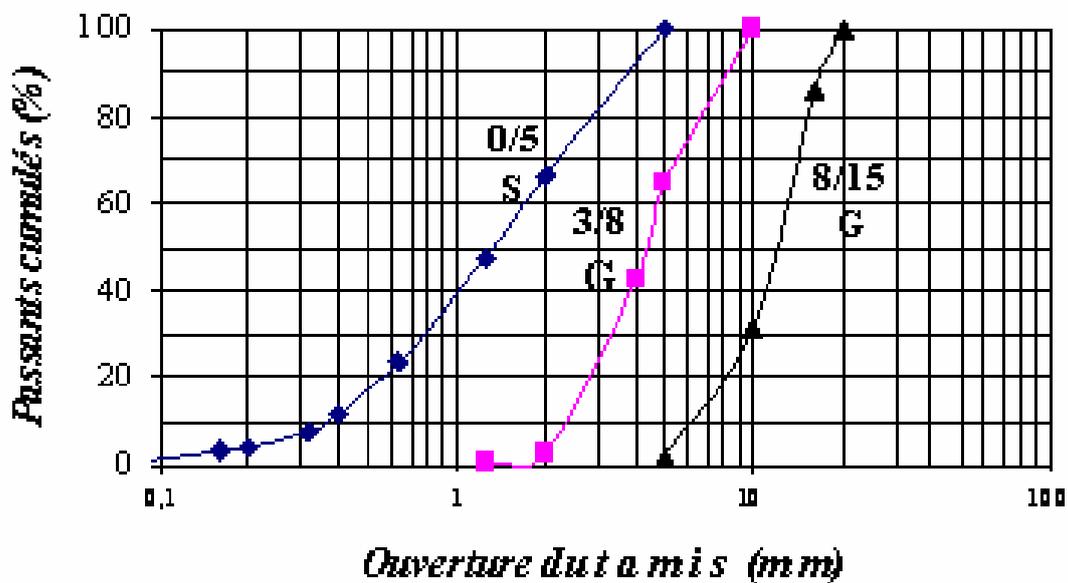


Figure 2.2 : Courbes Granulométriques du sable et des graviers

2.2.4 Le Superplastifiant

Nous avons utilisé, pour notre étude, deux familles de superplastifiants qui sont :

- Un polynaphtalène sulfonate (PNS) de la famille des polysulfonates qui fonctionnent par répulsion électrostatique
- Un polycarboxylate (PC) de la famille des polycarboxylates qui fonctionnent par répulsion stérique

(a) Polynaphtalène sulfonate (PNS) :

C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la deuxième génération fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom « MEDAPLAST 40 ». Il est à base de sulfonates, sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,6 % à 2,5 % (en extrait sec) du poids de ciment. Avec une chaîne moléculaire d'environ 2000, les polynaphtalènes sulfonés (PNS) peuvent donner une réduction d'eau jusqu'à 25%. Ses caractéristiques sont données dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Caractéristiques du PNS

Forme	Liquide
Couleur	Marron
Extrait sec	40%
Densité	1,22±0,01
pH	8,2
Teneur en chlorure	< 1g/l

(b) Polycarboxylate (PC) :

C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom « MEDAFLOW 30 ». Il est à base de polycarboxylates, sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,5% à 2% du poids de ciment.

Avec leur molécule de longues chaînes latérales et un poids moléculaire élevé ($n \geq 40000$), les polycarboxyliques d'éther arrivent à réduire l'eau d'environ 30%. Leur particularité est le maintien de l'ouvrabilité durant de longues heures (selon le dosage et le type de ciment utilisé) sans avoir un effet retardataire.

Tableau 2.5 : Caractéristiques du PC

Forme	Liquide
Couleur	Marron
Extrait sec	30%
Densité	1.07±0.01
pH	6.5
Teneur en chlorure	< 1g/l

2.2.5 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est l'eau du robinet de notre laboratoire exempte d'impuretés.

2.3 Formulations adoptées

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériaux de la gâchée, afin d'obtenir le béton qui aura les propriétés souhaitées. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Liant.

Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Évidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais : la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation. Bouhamou et al [150] précisent 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/ciment (E/C), le rapport addition/Ciment (F/C), le dosage en superplastifiant, le volume de pâte et le diamètre maximal des gravillons.

Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés définies ci dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton avec les termes qualitatifs de fluidité, hétérogénéité et absence de blocage.

Dans notre étude nous nous étions fixés comme but essentiel l'influence du laitier, comme ajout minéral, sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants. Pour cela, on a fixé tous les autres paramètres, à savoir la quantité de sable dans

le mortier donc le rapport Sable/Mortier, le rapport Eau/Liant ainsi que le pourcentage en superplastifiant par rapport au liant.

La formulation que nous avons adoptée est basée sur la formulation proposée par le japonais OKAMURA et appelée la méthode générale, 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 est une phase très importante car elle fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés requises pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant, une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques. En terme de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange. La fluidité élevée du mortier autoplaçant (MAP) peut être obtenue en ayant recours à des superplastifiants sans augmenter le rapport eau/ciment. L'ajout d'un superplastifiant peut provoquer une diminution significative du seuil de cisaillement mais n'aura qu'une influence limitée sur la viscosité plastique, tandis qu'une quantité supplémentaire d'eau peut diminuer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Selon Jin et Domone [65], 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 dominantes.
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode et simple que tester un béton.

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 la non ségrégation du béton durant l'écoulement [51].

En l'absence d'un rhéomètre pour mesurer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, la fluidité du mortier a été évaluée par l'essai d'étalement et l'essai de l'entonnoir (V-funnel) qui, ont été utilisés par plusieurs chercheurs [51].

Pour la formulation du mortier autoplaçant, et comme mentionné précédemment, on s'est basé sur la méthode OKAMURA avec une amélioration au niveau de la teneur en sable, le rapport Eau/Liant (E/L) et le rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L) pour s'adapter aux propriétés des matériaux locaux et en particulier le sable. La sélection du rapport sable/mortier et du rapport Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette 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 $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$ [51]. Il faut noter ici que le mélange de mortier ne comportera pas de laitier.

2.3.1.1 Rapport Eau/Liant (E/L)

Nous avons effectué beaucoup d'essais préliminaires de mesure d'étalement et de temps d'écoulement afin de fixer le rapport eau/liant (E/L). Felekoglu et al [101] ont montré que le rapport E/C optimum pour produire un BAP est compris dans l'intervalle 0,84 et 1,07 en volume qui correspond à l'intervalle 0,28 et 0,45 en masse. Les rapports E/C au dessus et en dessous de cet intervalle peuvent causer un blocage ou une ségrégation du mélange.

Les différents essais préliminaires ont montré qu'il faut aller jusqu'au rapport 0,40 afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270 mm surtout dans le cas de faibles dosages en superplastifiants.

Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0,40.

2.3.1.2 Rapport Sable/Mortier (S/M)

L'optimisation du rapport Sable/Mortier consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer par la suite de bonnes caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports Sable/Mortier de 0,60; 0,55 et 0,50 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/liant (Sp/L).

2.3.1.3 Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en superplastifiants (PNS et PC), sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement (cône

d'Abrams) et du temps d'écoulement (V-funnel), en fonction du dosage en superplastifiants Sp/L variant de 1.2% à 2.2%.

2.3.1.4 Confection des mortiers

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculés d'après l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe B.

Aiad et al [151] trouvent que le retard dans l'addition du superplastifiant améliore la rhéologie du mélange. Pour eux le temps optimal pour introduire le superplastifiant est de 10 minutes après avoir ajouté de l'eau au mélange. Par contre Domone et Jin [51] proposent l'introduction du superplastifiant à partir de la 2ème minute après le commencement du malaxage. Dans nos essais nous avons opté pour la proposition de Domone et Jin [51]. La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier.

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

La séquence de malaxage du mortier est mentionnée sur la figure 2.3.

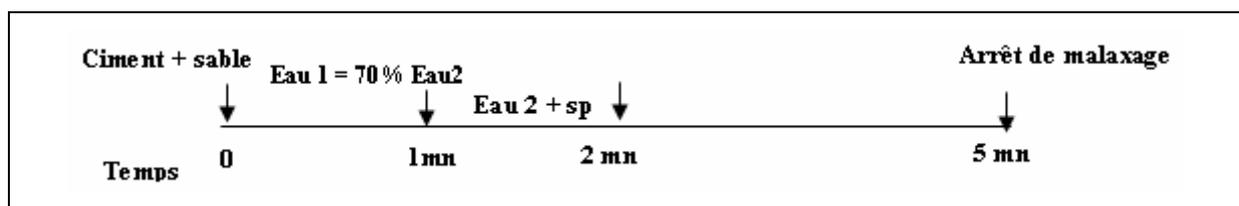


Figure 2.3 : Séquence de malaxage du mortier [51]

2.3.2 Formulation du BAP de Référence

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

Du moment que le mortier, dans les bétons autoplaçants, occupe un volume important dans le mélange, les résultats des essais sur mortier seront concluants. A l'étape suivante, on

cherchera le BAP de référence (0% Laitier) en se basant sur les résultats des essais sur mortier, si nécessaire les rapports surtout E/L et Sp/L seront ajustés afin d'aboutir aux résultats adéquats pour un bon étalement sans ségrégation ni ressuage.

Une fois que les rapports seront déterminés, on procèdera aux différents essais sur béton frais et sur béton durci. Pour la confection du béton autoplaçant, les proportions du mélange (ciment, gravier, sable, eau et superplastifiant) ont été calculés d'après l'exemple de composition du béton donné à l'annexe C.

2.3.2.1 Fixation des rapports Sable/Mortier (S/M) et Eau/Liant (E/L)

Afin de minimiser le nombre de variables pour le béton autoplaçant de référence, nous avons jugé judicieux de maintenir fixe les deux rapports S/M et E/L trouvés lors des essais effectués sur le mortier, et chercher la meilleure formulation du BAP de référence en ajustant le rapport Sp/L.

2.3.2.2 Fixation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)

Comme point de départ, on prendra le résultat des essais sur mortiers, du rapport Sp/L. Il suffit de quelques mesures d'étalement (au cône d'Abrams) et de temps d'écoulement à l'entonnoir en V, pour trouver le meilleur rapport Sp/L donnant un bon béton autoplaçant sans ségrégation ni ressuage. Une fois que le BAP de référence est obtenu, pour les autres BAP, on commence par substituer une partie du ciment par du laitier et on procèdera à tous les essais sur béton frais. L'étude se fait pour les deux types de superplastifiants (PC) et (PNS).

2.3.2.3 Confection des Bétons Autoplaçants

En général, pour un faible rapport eau/liant et un fort dosage en superplastifiant, le mélange nécessite un temps de malaxage plus prolongé [152]. Un malaxage intensif disperse mieux les particules de poudres. Dans le cas de mauvais malaxage ces particules de poudres restent dans la phase pâte et rendent le béton plus visqueux [153]. De Larrard et al [154] ont montré que l'étalement et la résistance à la compression sont les plus influencés par le temps de malaxage.

Le superplastifiant est plus efficace lorsqu'il est ajouté après l'humidification du béton (environ 70% de l'eau de gâchage).

La séquence de malaxage et la composition du béton ont un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à obtenir un béton performant et durable.

Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur traditionnel d'une capacité de 40 litres. La procédure de malaxage adoptée est celle proposée par Domone et Jin (Figure 2.4).

- 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

$$E_{\text{eff}} = E_{\text{totale}} - E_{\text{teneur en eau}} - E_{\text{adjuvant}} + E_{\text{absorbée par granulats}} \quad (\text{voir Annexe C})$$
- Calculer les proportions du ciment, sable, gravier 3/8, gravier 8/15 et superplastifiant (voir Annexe C).
- 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 (Eau1 = 70% Eau) ;
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) ;
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Remalaxer pendant 30 secondes.

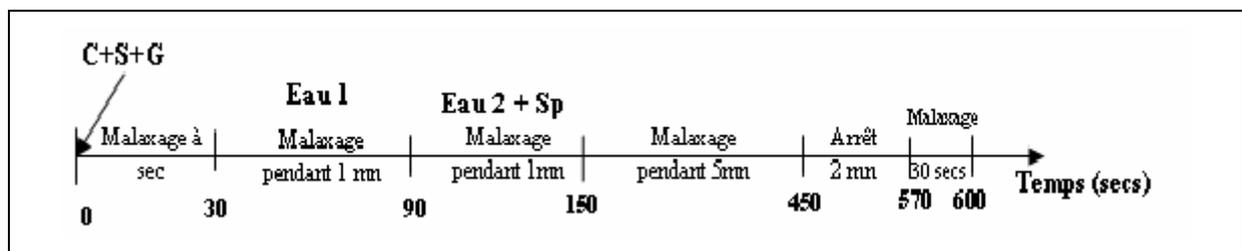


Figure 2.4: Séquence de malaxage du béton autoplaçant [51]

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 [149] ont montré que le laitier algérien est d'une activité moyenne et que le taux de substitution est de 15 à 20% de laitier sans dépasser un maximum de 30%.

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%. En plus du BAP de référence, nous avons étudié quatre types de BAP pour chacun des deux types de superplastifiants que nous appellerons BAP1 à BAP9.

2.3.4 Mesure de la perte d'ouvrabilité

Pour pouvoir estimer la perte d'ouvrabilité en fonction du temps, nous avons jugé utile de mesurer l'étalement (au cône d'Abrams) à des temps différents jusqu'à ne plus obtenir un béton autoplaçant. Nous avons mesuré l'étalement à 0, 30, 60 et 90 minutes.

2.3.5 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, on dira que la décision du choix de la formulation n'était pas chose facile à prendre. Elle dépendait essentiellement de la qualité des matériaux utilisés, essentiellement le sable. Comme essais préliminaires nous avons dû essayer plusieurs types de sables (sables de dunes, sables de rivière et sable de mer). Ce qui a été constaté est que les sables contenant un pourcentage important de fines ne pouvaient pas donner un bon mortier autoplaçant. Autre décision importante qu'on devait prendre, la fixation du dosage en eau, avec l'utilisation ou non d'un agent de viscosité. Nous avons jugé utile de ne pas utiliser ce dernier pour la simple raison de vulgariser et banaliser la production des bétons autoplaçants au niveau local. La formulation appelée « Méthode Générale » proposée par le Japonais OKAMURA, était la première conçue et ressemblait beaucoup à celle d'un béton ordinaire adjuvanté. À partir de cette formulation se sont découlés plusieurs formulations à travers le monde entier dans le but d'étudier la possibilité de confectionner un BAP en utilisant les matériaux disponibles localement.

CHAPITRE 3

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE 3

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

3.1 Introduction

La formulation adoptée est modifiée de telle manière que les matériaux locaux puissent donner un bon mortier autoplaçant et un bon béton autoplaçant.

On procèdera donc à quelques essais relatifs au mortier afin de pouvoir fixer les dosages en eau, en sable et en superplastifiant. Nous réaliserons également des essais sur le béton à l'état frais afin de pouvoir étudier l'ouvrabilité et la rhéologie du béton. Cette série sera suivie par des essais sur le béton durci pour déterminer les résistances mécaniques des mélanges à l'état durci. On notera que tous les essais mentionnés ci-dessous seront réalisés au laboratoire de Géomatériaux de l'université de Blida ainsi que le laboratoire de Béton de l'Université de Médéa.

3.2 Essais relatifs au Mortier à l'état frais

3.2.1 Essai d'Étalement au Mini-Cone

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenue. La figure 3.1 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

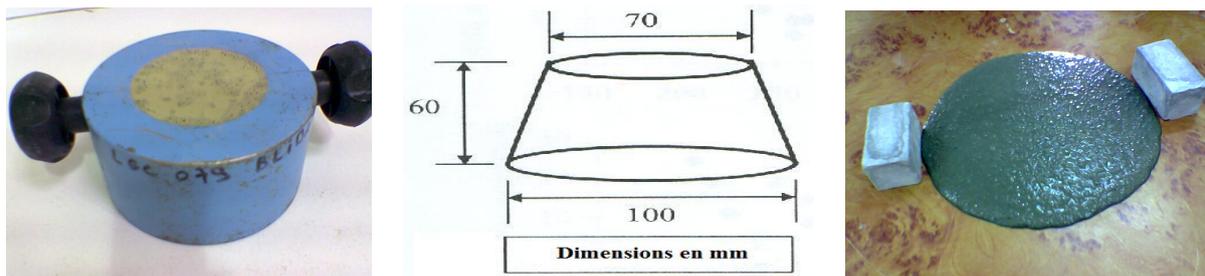


Figure 3.1 : Essai d'Étalement pour Mortier

3.2.2 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 un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure 3.2).

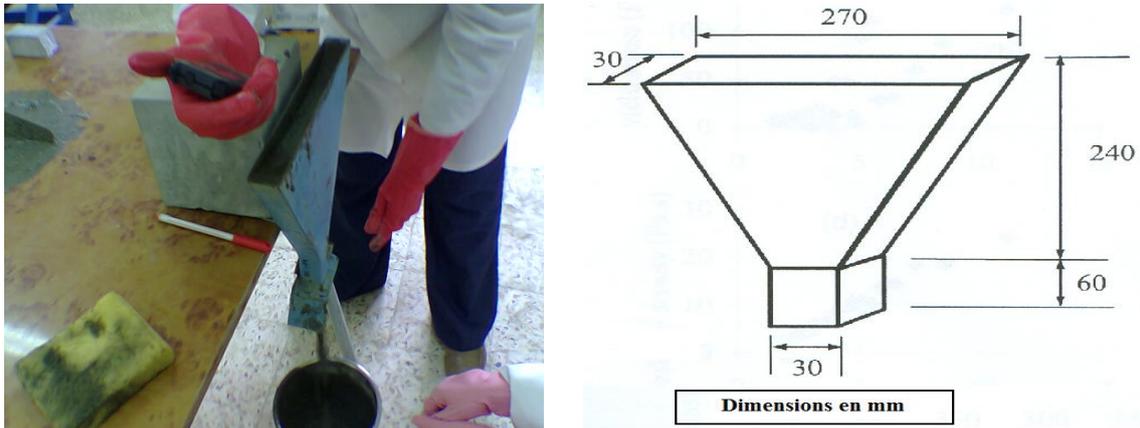


Figure 3.2 : Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier

Nawa et al [155], ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10s produisent un BAP réussi. Quand à Chai, qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 s [156].

3.2.3 Essai de la Chaleur d'Hydratation

Quand le ciment portland réagit avec l'eau, il y a dégagement de chaleur qui peut être mesuré par un calorimètre. Donc, le dégagement de chaleur et ainsi l'évolution de l'hydratation pourront être suivis dans le temps pour comprendre les réactions qui se passent lors de l'hydratation du ciment, et faire un lien avec sa prise et le développement des résistances.

Dans notre cas nous avons utilisé la méthode de la calorimétrie semi-adiabatique appelée essai "quasi-adiabatique".(Q.A.B). Cet essai est équivalent à celui de la "bouteille de LANGAVANT" pour les mortiers.

L'essai Q.A.B se rapproche d'avantage de ce qui se passe dans les pièces épaisses qui sont celles où les problèmes liés aux effets thermiques sont importants.

Le caisson Q.A.B utilisé dans nos travaux est fabriqué par le CECP (Centre d'Etude de Construction des Prototypes) d'Angers et le prototype a été étudié par le LRPC (Laboratoire Régional des Ponts de Chaussées) de Bordeaux ; l'isolant du caisson est constitué de mousse polyuréthane dont le coefficient de conductivité thermique est de $0,23 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$. Il est conçu pour recevoir une éprouvette de béton normalisée $16 \times 32 \text{ cm}$. Les températures sont mesurées au centre de l'éprouvette par un thermocouple "PT 100".

Le calcul des champs de température à l'intérieur d'un élément de béton durcissant passe par la connaissance de la courbe de dégagement de chaleur de ce béton. L'essai consiste à enregistrer la température du béton en fonction du temps, dans des conditions quasi-adiabatiques où les pertes de chaleur ne sont pas totalement évitées. Etant donné les pertes de chaleur apparaissant lors de l'essai, le résultat obtenu est corrigé en fonction d'un étalonnage préalable du caisson. Il est possible, à partir de la courbe de température enregistrée, de remonter à la courbe adiabatique. L'annexe D donne les valeurs de température enregistrées en fonction du temps pour les différentes teneurs en laitier.

Le banc de mesure comporte deux calorimètres semi-adiabatique dont les thermocouples sont reliés à une chaîne de mesures multi-voies (Société PERRIER LABOTEST) à microprocesseur permettant de mémoriser les températures en cours d'essai. Un logiciel installé sur un PC permet de transférer l'intégralité du contenu de la mémoire, essai par essai (Figure 3.3). Il suffit de rentrer les constantes du calorimètre ainsi que les masses respectives de chaque composant introduit dans l'appareil et le logiciel calcule directement la quantité de chaleur dégagée "q" par gramme de liant. On obtient directement les courbes d'échauffement et la chaleur d'hydratation en fonction du temps.



Figure 3.3 : Dispositif expérimental pour la mesure de la Chaleur d'Hydratation.

Le temps t est compté à partir du moment où l'eau est ajoutée dans le malaxeur. La chaleur d'hydratation q du ciment à un instant t est égale à :

$$q(t) = \frac{C}{Mc} \Delta\Theta + \frac{1}{Mc} \int_0^t \alpha \Delta\Theta dt \quad (3.1)$$

Avec :

Mc (g) : masse de ciment ou de liant contenu dans l'éprouvette

C (J/°C) : capacité thermique totale du calorimètre et de l'éprouvette

α (J/h°C) : coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre donné par étalonnage

$\Delta\Theta$ (°C) : échauffement de l'éprouvette par rapport à la température ambiante

Les différents facteurs entrant dans le calcul de la chaleur d'hydratation $q(t)$ avec les coefficients du calorimètre utilisé sont donnés à l'annexe D. On notera enfin que cet essai a été réalisé au laboratoire de Mécanique et Matériaux Génie Civil, à l'Université Cergy-Pontoise (France).

3.3 Essais relatifs au BAP à l'état frais

Les essais présentés ci-dessous caractérisent les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais mentionnées précédemment au paragraphe 1.6 et qui ont été réalisés dans le cadre de ce travail.

3.3.1 Essai d'étalement (Flow test)

L'essai d'étalement peut être utilisé pour évaluer la capacité de remplissage à l'état libre en l'absence d'obstacles. Cet essai permet de déterminer la capacité du béton à se déformer sous son poids propre. C'est l'essai type pour évaluer la déformabilité libre du béton autoplaçant [62].

L'essai d'étalement est effectué à l'aide d'un cône d'Abrams. Ce dernier est un cône sans fond, dont le diamètre de base inférieur est de 203 mm et le diamètre de base supérieur est de 102 mm. Il a une hauteur de 305 mm. Le cône d'Abrams est habituellement utilisé pour

caractériser les bétons conventionnels par une mesure d'affaissement. Dans le cas des bétons autoplacants, l'essai de l'affaissement au cône d'Abrams n'est pas significatif car ces bétons sont trop fluides. On utilise donc une mesure de l'étalement. Le principe de l'essai reste cependant le même.

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 3.4). 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 [62].



Figure 3.4 : Mesure du diamètre d'étalement

Selon EFNARC [60], la mesure de l'étalement au cône d'Abrams, peut être divisée en trois (03) classes. Le tableau 3.1 définit ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP:

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. Des valeurs d'étalement dépassant les 850 mm peuvent être spécifiées pour des cas spéciaux mais une attention

particulière doit être portée quant à la résistance à la ségrégation, et la dimension maximale des granulats doit être normalement inférieure à 12 mm.

Avec le même essai, on mesurera le temps d'écoulement T_{50} , qui correspond au temps mesuré, à partir du commencement de l'étalement de la galette jusqu'à atteindre un diamètre de 500 mm. Ce temps d'écoulement T_{50} peut donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange [60].

Tableau 3.1 : Classes des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation

Classe	Etalement (en mm)	Domaine d'utilisation du BAP
SF1	550 – 650	<ul style="list-style-type: none"> • Structures non 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

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

L'essai de l'entonnoir mis en place par Okamura et Ozawa en 1995 permet d'évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir (en secondes).

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

Comme l'essai de la capacité de remplissage, l'essai de l'entonnoir en V (voir figure 3.5) nous renseigne sur la stabilité, c'est-à-dire s'il existe de la ségrégation, ainsi que sur la viscosité du mélange étudié. S'il y a de la ségrégation, on observera un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir, ou si le mélange est trop visqueux, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important [62].

Selon EFNARC [63] Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Il recommande un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante.

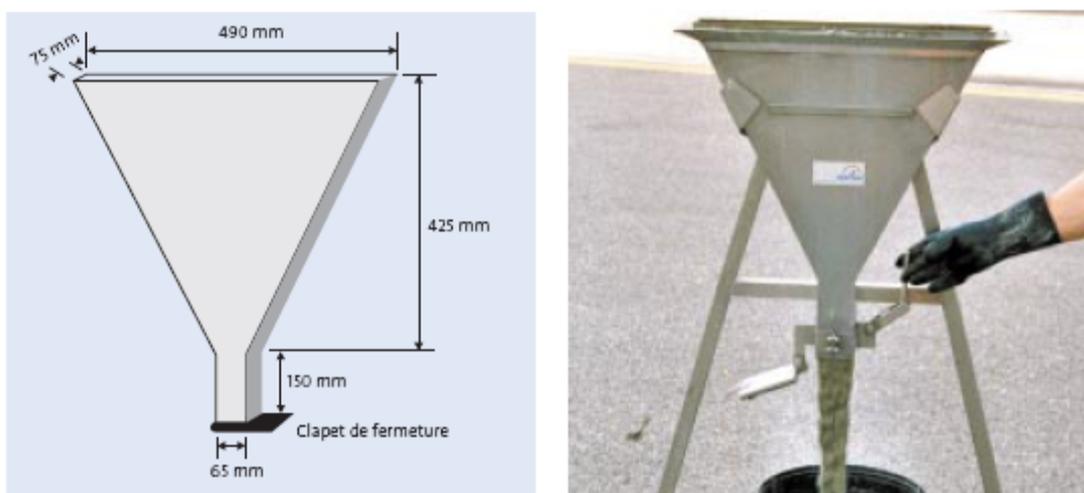


Figure 3.5 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)

3.3.3 Essai à la Couronne J (J-Ring test)

L'essai à la couronne J (J-ring test) est utilisé pour étudier la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Il permet aussi d'étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. L'essai J-ring mesure trois paramètres : l'étalement, le temps d'écoulement T_{50J} et le blocage [157].

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 (Figure 3.6). 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 $\phi 16$ à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton 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.

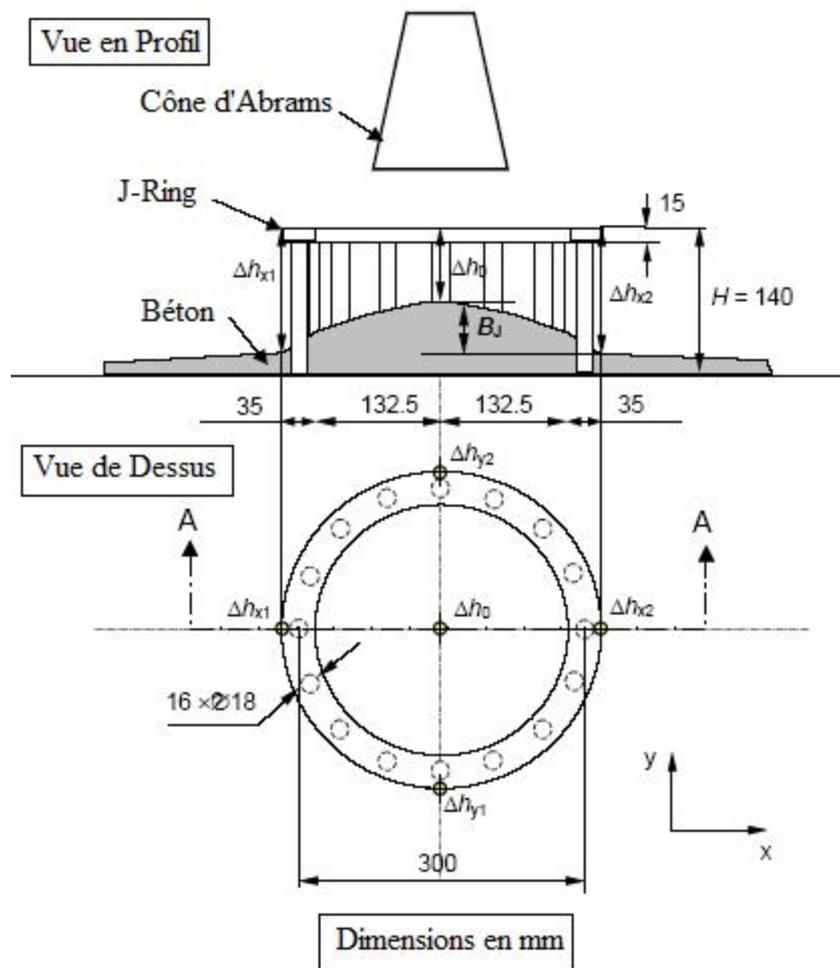


Figure 3.6 : Dimensions du J-ring et positions pour mesure de Différence d'Hauteurs

Mesures à prendre :

(a) Étalement S_J :

On mesurera en premier lieu le plus grand diamètre de la galette du BAP d_{\max} (Figure 3.7), puis le diamètre perpendiculaire d_{perp} , puis on calculera l'étalement à partir de la formule suivante :

$$S_J = \frac{(d_{\max} + d_{\text{perp}})}{2} \quad (3.2)$$

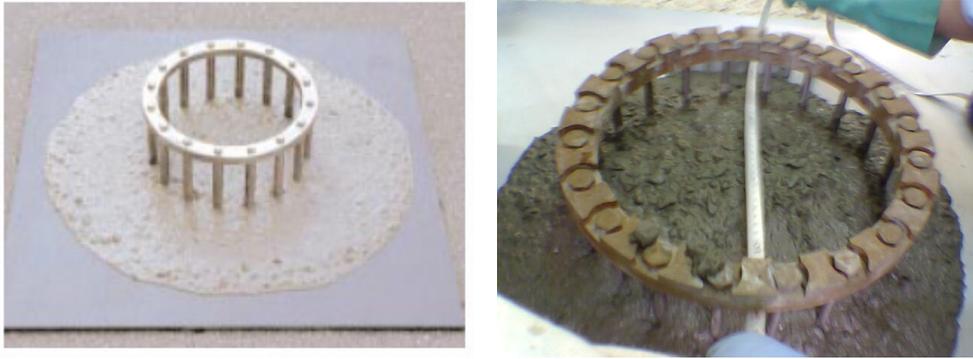


Figure 3.7 : mesure d'étalement en présence du J-Ring

(b) Temps d'Écoulement T_{50J} :

Le temps d'écoulement T_{50J} est la période entre le moment où le cône est soulevé et le moment où le BAP touche le cercle de diamètre 500 mm.

(c) Différence d'Hauteurs B_J :

Cette mesure consiste à mesurer 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 3.8. D'après Jin et Domone [64] pour un bon BAP sans risque de blocage, la différence de hauteur B_J ne doit pas dépasser 10 mm. B_J est calculée avec la formule suivante :

$$B_J = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0 \quad (3.3)$$



Figure 3.8 : Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring

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

Avec l'essai à la boîte en L, il est possible de tester la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en L. On place le béton dans la « tour » de l'appareil (hauteur de 600 mm), soit

environ 12,7 l de béton. On peut éventuellement laisser le béton au repos une (1) minute pour voir s'il y a de la ségrégation. Ensuite on retire la trappe et on mesure le temps (en secondes) que met l'échantillon de béton à s'écouler sur la longueur horizontale (Figure 3.9).

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.

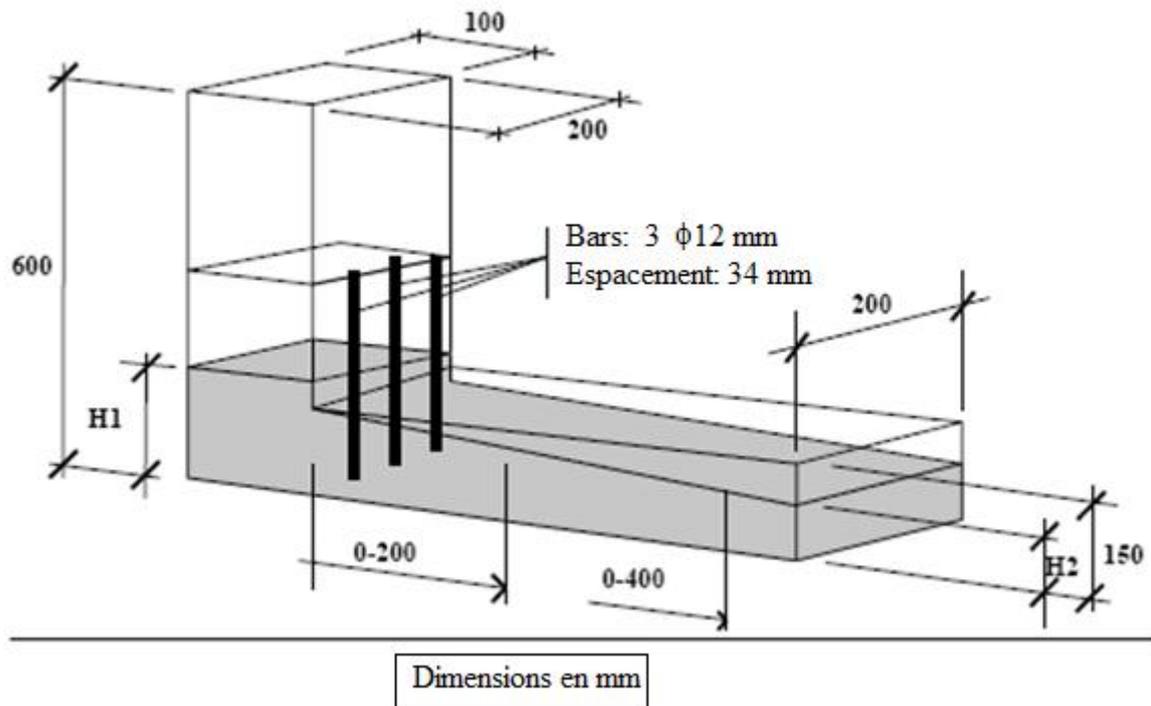


Figure 3.9 : Dispositif de l'essai L-Box

Mesures à prendre :

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

- Le temps d'écoulement du béton T_{20} pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale).
- Le temps d'écoulement du béton T_{40} pour arriver à la distance 400 mm (dans la partie horizontale).
- Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs $H1$ et $H2$ (Figure 3.5).

On peut alors calculer le rapport $H2/H1$. Pour une bonne capacité de passage, une valeur du rapport entre 0,8 et 0,85 est acceptable. La capacité de passage et la résistance à la

ségrégation, peuvent être détectées visuellement, si on observe un résidu de granulats dans la partie verticale du L (avant les barres de ferrailage), on pourra conclure qu'il y a soit blocage soit ségrégation. Si, par contre, on observe une bonne distribution des gros granulats tout au long de la partie horizontale du L-Box, on pourra dire que ce béton est homogène. Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour T_{20} et inférieures à 3.5 secondes pour T_{40} afin de rester dans un domaine autoplaçant [157].

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

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boîte en L, l'essai du tube en U 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 3.10) 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 de hauteur se rapproche le plus de cette valeur nulle [63].

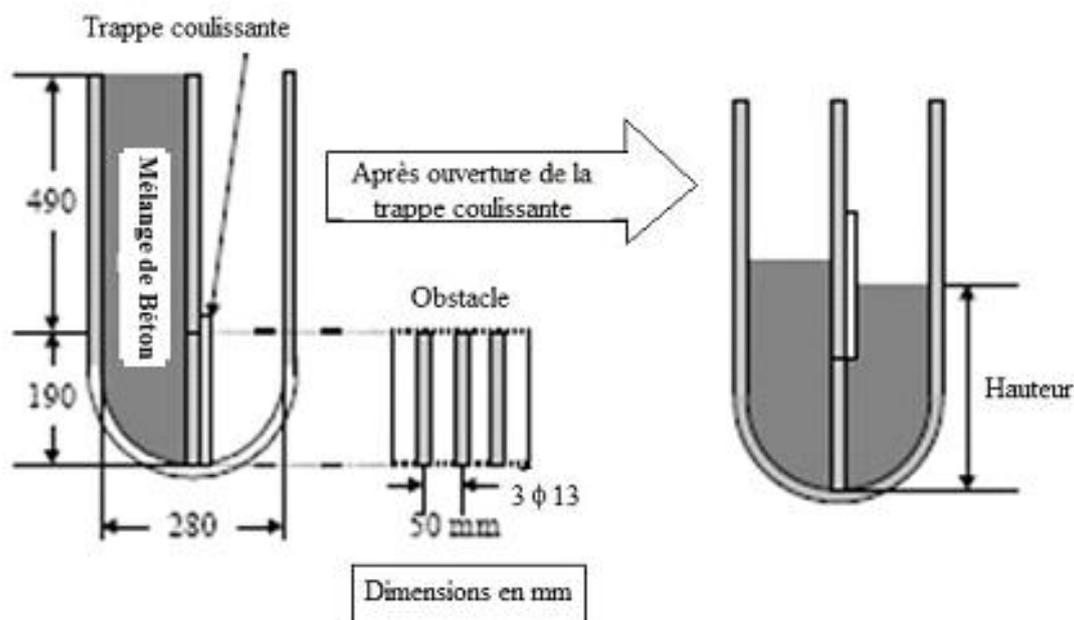


Figure 3.10 : Dispositif de la boîte en U (U-Box)

3.3.6 Essai de résistance à la ségrégation par tamisage (Sieve segregation resistance test)

Cet essai est proposé dans les recommandations provisoires de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) [5]. Un échantillon de 10 l de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser 4,8 kg (tolérance $\pm 0,2$ kg) de l'échantillon sur un tamis. Après 2 min d'attente, le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'expression (Figure 3.11).

$$\Pi = \frac{P_{\text{laitance}} \cdot 100}{P_{\text{échantillon}}} \quad (3.4)$$



Figure 3.11 : Essai de résistance à la ségrégation au tamis

Le critère de stabilité de cet essai est :

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

Lorsque $0 \leq \Pi \leq 5\%$, la résistance à la ségrégation est dite « trop importante ». La pâte ou le mortier est trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis. Cela peut conduire à une qualité de parements assez mauvaise [158]. La conclusion de cet essai est qu'il est sensible aux variations de dosage en superplastifiant ou en eau.

3.3.7 Essai au cône d'Abrams modifié pour déterminer les paramètres rhéologiques

Une modification du cône d'Abrams a été développée par De Larrard et Ferraris [159] (Figure 3.12) pour permettre l'évaluation des deux caractéristiques de Bingham du béton

frais, le seuil de cisaillement τ_0 et la viscosité μ . La modification consiste à mesurer non seulement la taille finale d'affaissement mais également la vitesse à laquelle le béton s'effondre. La mesure du temps T que met l'échantillon pour s'affaisser de 100 mm est une mesure rhéologique.

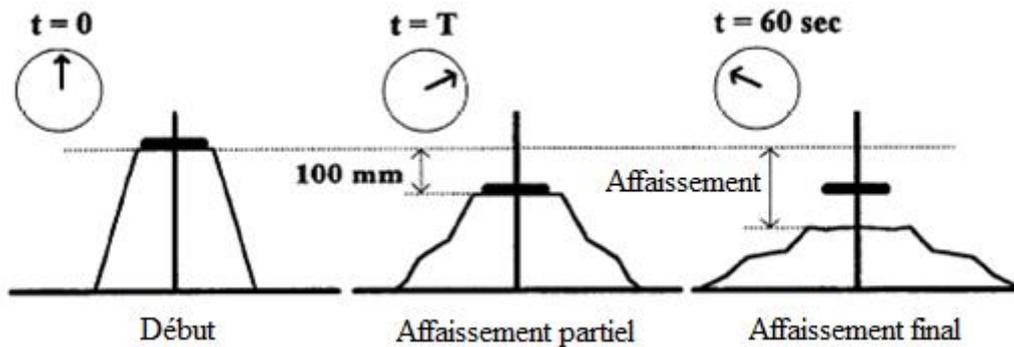


Figure 3.12 : Schémas de l'essai du cône d'Abrams modifié.

La méthode originale consiste à mesurer le temps pour qu'un disque en contact avec la surface supérieure du béton, se glisse avec le béton vers le bas à une distance de 100 mm.

Des chercheurs à l'université de Sherbrooke, ont éliminé le disque et ont fait raccourcir l'axe central de sorte que son sommet soit à 100 mm au dessous de la hauteur totale du cône d'Abrams. Ensuite l'essai consiste à mesurer le temps pour que le béton s'affaisse d'une hauteur où l'axe soit visible.

(a) affaissement S :

C'est le même essai d'affaissement connu mais au cône d'abrams modifié (Figure 3.13).



Figure 3.13 : Mesure de l'affaissement au cone d'abrams modifié

(b) Temps d'affaissement de 100 mm :

Cet essai consiste à déterminer le temps que met l'éprouvette de béton pour s'affaisser de 100 mm. Ce temps représente une caractéristique rhéologique qui symbolise la déformation du béton dans son écoulement.

(c) Evaluation du seuil de cisaillement :

L'affaissement (S) au cône, combiné avec la densité du béton, permet d'évaluer le seuil de cisaillement avec une certaine précision, dans la gamme des consistances très plastique à fluide (affaissements supérieurs à 10 cm).

A partir des mesures d'affaissements effectués sur bétons frais, Ferraris et de Larrard [160,161] ont adapté une relation qui calcule la valeur du seuil de cisaillement τ_0 , soit :

$$\tau_0 = \frac{\rho}{347}(300 - S) + 212 \quad (3.5)$$

Où ρ = masse volumique exprimée en kg/m^3 , S = affaissement final en mm et τ_0 en Pa.

Roussel [162] en essayant de faire une corrélation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement au cône d'abrams, a obtenu une relation un peu différente de celle proposée par Ferraris et De Larrard.

$$S = 25,5 - 17,6 \frac{\tau_0}{\rho} \quad (3.6)$$

(d) Evaluation de la viscosité plastique :

Le temps d'affaissement (T), combiné avec les mesures précédentes, peut fournir une évaluation de la viscosité plastique μ . Le domaine d'application de l'essai, pour l'évaluation de la viscosité, est donné pour les bétons d'affaissement compris entre 12 et 26 cm.

L'équation utilisée a été déterminée par Ferraris et de Larrard [160,161], soit :

$$\mu = \rho.T.1,08.10^{-3}(S - 175) \quad \text{Pour } 200 < S < 260 \text{ mm.} \quad (3.7)$$

$$\mu = 25.10^{-3}.\rho.T \quad \text{Pour } S < 200 \text{ mm.} \quad (3.8)$$

Équation dont on déduit directement une expression de la viscosité plastique μ (Pa.s) en fonction de la densité ρ en kg/m^3 , de l'affaissement final S en mm et du temps d'affaissement T en secondes.

3.4 Essais relatifs au BAP à l'état durci

Les essais relatifs au BAP à l'état durci se limitent à la détermination des résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion.

3.4.1 Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur des éprouvettes cubiques (15×15×15) cm, à 7, 28, 56 et 90 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 kN (Figure 3.14). L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture.



Figure 3.14 : Dispositif pour l'Essai de compression

3.4.2 Résistance à la traction

Cet essai est l'essai de flexion quatre points et est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (15×15×500) cm (Figure 3.15). La résistance à la traction par flexion est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2a^3} \quad (3.9)$$

On affecte un coefficient de 0,6 aux valeurs trouvées pour tenir compte de la plastification du béton en on déduit les résistances à la traction (σ_t) :

$$\sigma_t = 1.8 \frac{PL}{2a^3} \quad (3.10)$$

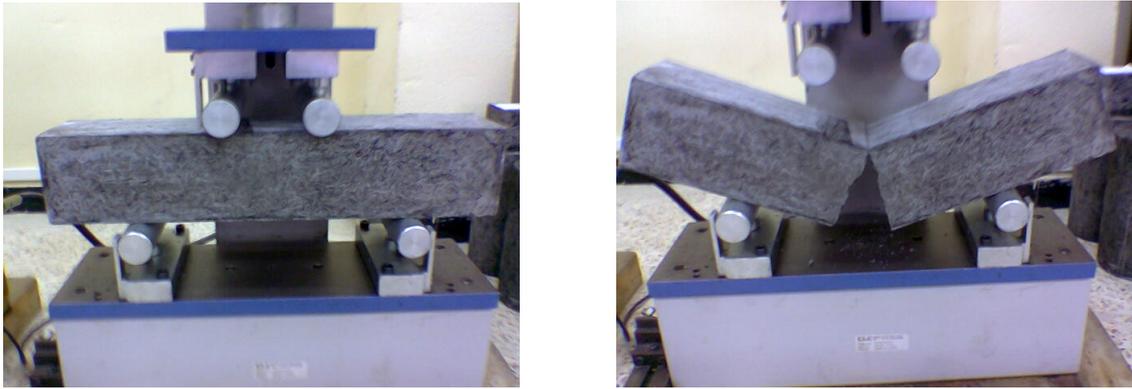


Figure 3.15 : Schéma de l'essai de traction par flexion à quatre points

3.5 Récapitulatif du programme des essais réalisés

3.5.1 Essais sur Mortier

Le nombre d'essais réalisés sur mortier équivaut à 9 essais pour chaque type de superplastifiant, plus 5 essais sur la chaleur d'hydratation.

Le nombre total d'essais réalisés est égale à : $9 \times 2 + 5 = 23$ essais

Le diagramme suivant (Figure 3.16) résume les essais réalisés sur mortier.

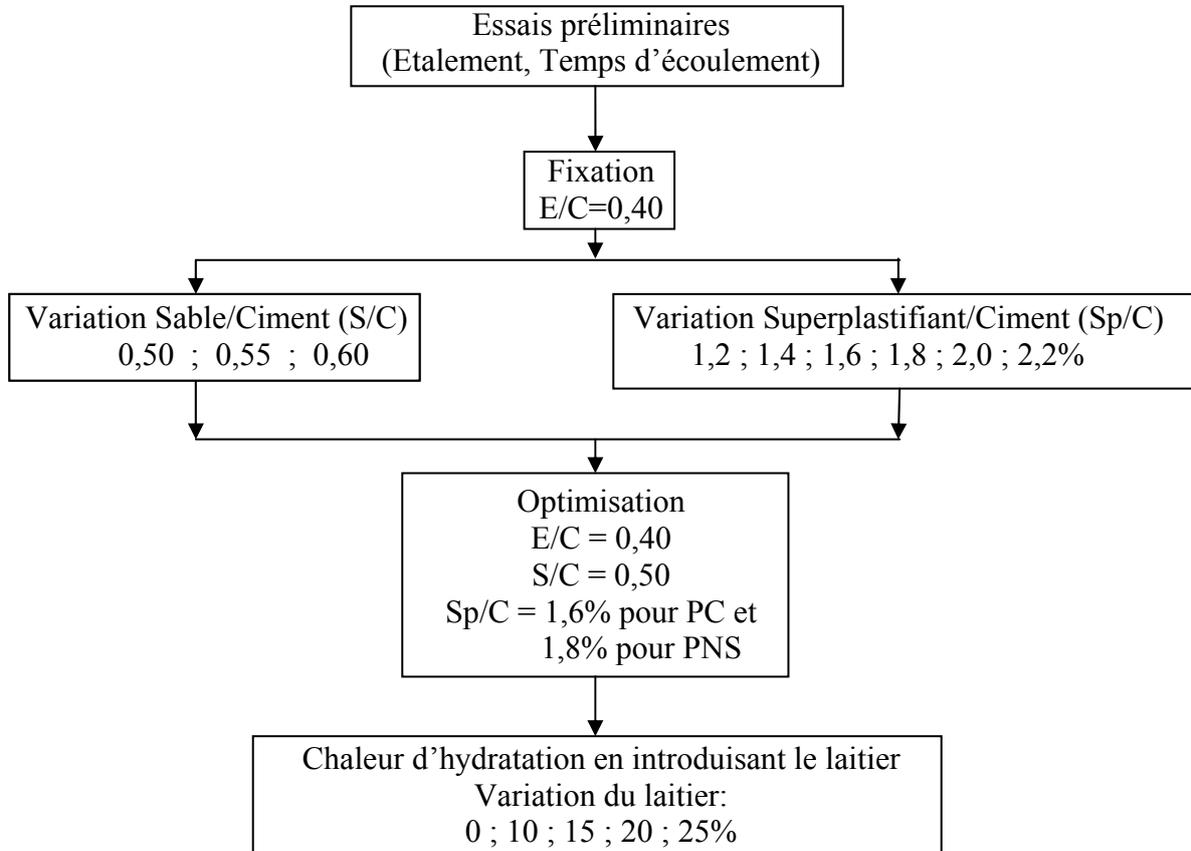


Figure 3.16 : diagramme des essais réalisés sur mortier.

3.5.2 Essais sur Béton

Les essais sur béton se divisent en deux parties :

- Essais sur béton à l'état frais :

Le nombre d'essais équivaut à 12 pour chaque pourcentage de laitier

Le nombre total d'essais est égale à : $12 \times 5 = 60$ essais

Le diagramme suivant (Figure 3.17) résume les essais réalisés sur le béton à l'état frais.

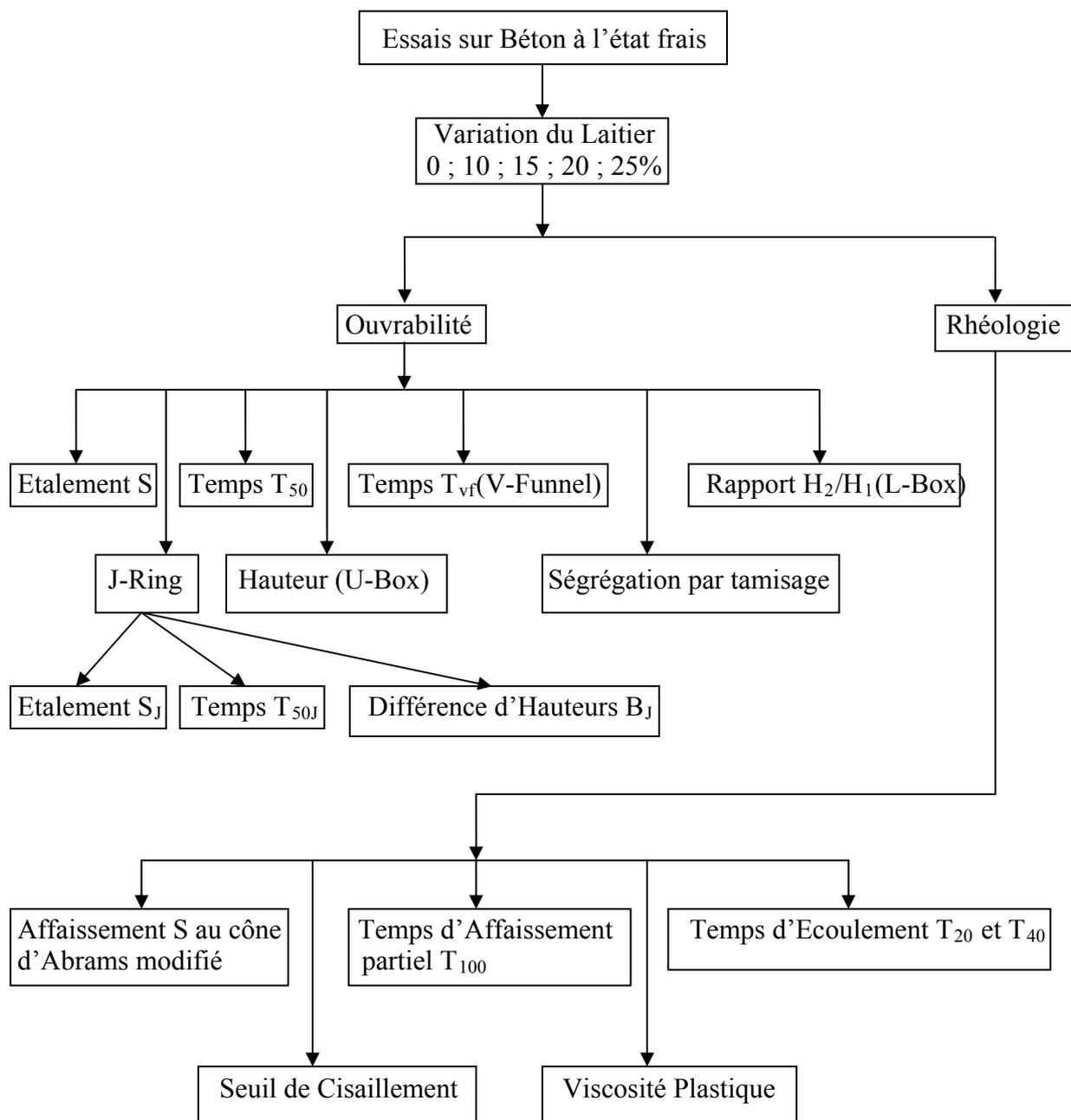


Figure 3.17 : diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais.

- Essais sur béton à l'état durci :

Les essais sur béton à l'état durci sont au nombre de 2 pour chaque pourcentage de laitier.

Le diagramme suivant (Figure 3.18) résume les essais réalisés sur le béton à l'état durci.

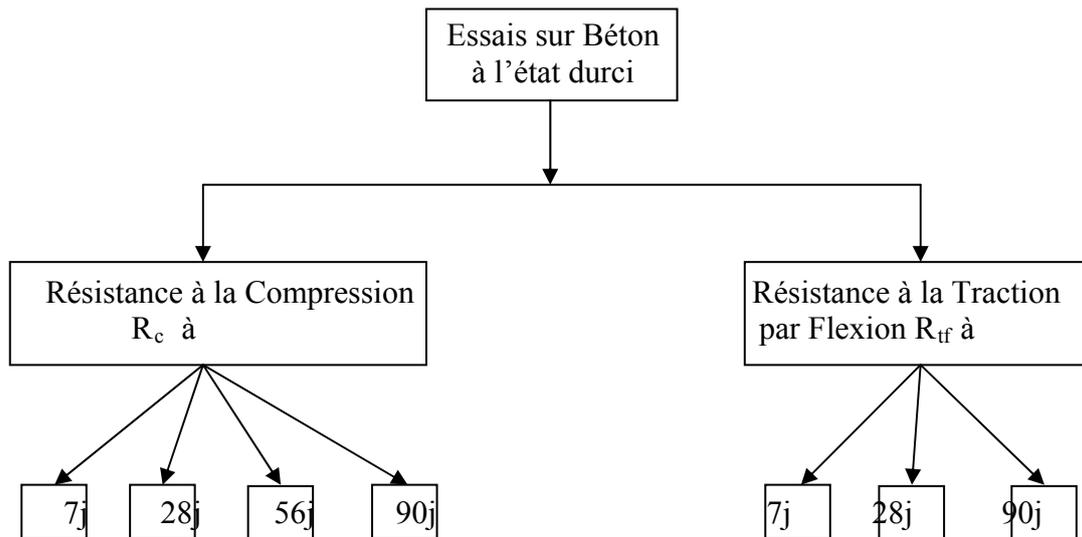


Figure 3.18 : diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci.

3.6 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, on dira que le nombre d'essais qui a été effectué dans le cadre de cette thèse était important et il n'était pas évident que tous les résultats allaient entrer dans les fourchettes préconisées par la littérature.

Pour ce qui est des essais sur mortiers, il était impératif de faire plusieurs essais préliminaires afin d'optimiser les dosages en eau, en sable et surtout en superplastifiants. Dans le chapitre suivant sont exposés les différents résultats des différents essais sur mortiers et sur béton suivis d'interprétations et comparaisons avec ceux obtenus par la littérature.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET INTERPRÉTATIONS

CHAPITRE 4

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET INTERPRÉTATIONS

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous exposerons et analysons les résultats des différents essais effectués en les confrontant aux résultats de la bibliographie. L'analyse de ces résultats nous conduira à des recommandations. Nous nous intéresserons tout d'abord aux essais effectués sur mortier afin d'optimiser, dans un premier temps, le rapport sable/mortier, puis le rapport S_p/L que l'on pourra utiliser, par la suite, dans la composition du béton autoplaçant. Nous étudierons ensuite l'effet du laitier sur la chaleur d'hydratation et enfin l'effet du laitier sur le besoin en eau.

La seconde étape concernera l'étude des résultats des essais effectués sur le béton après avoir fixé tous les paramètres avec pour seule variable le pourcentage du laitier par rapport à la quantité de ciment. On étudiera l'influence du laitier sur l'ouvrabilité et les caractéristiques rhéologiques du béton frais, ainsi que les caractéristiques mécaniques et de durabilité du béton à l'état durci.

4.2 Optimisation du rapport Sable/Mortier (S/M)

L'optimisation du rapport Sable/Mortier consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer une meilleure performance du béton autoplaçant à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports Sable/Mortier de 0.60, 0.55 et 0.50 avec un rapport E/C de 0.40 fixe pour toutes les compositions tout en faisant varier le rapport S_p/L .

Les différentes compositions des mortiers autoplaçants obtenues, en fonction du rapport S/M sont présentées dans le tableau 4.1 ainsi que les résultats des essais d'étalement au mini-cône et du temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel).

Tableau 4.1 : Composition et Résultats des essais sur mortiers pour différentes valeurs de S/M

		Sable/Mortier 0.60		Sable/mortier 0.55	Sable/Mortier 0.50					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Ciment (kg/m ³)		550	550	626	696	696	696	696	696	696
Sable (kg/m ³)		1546	1546	1447.70	1348	1348	1348	1348	1348	1348
Eau (kg/m ³)		220	220	250	278	278	278	278	278	278
Superplastifiant (%)		1	1.8	1.8	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
Étalement (mm)	PC	/	/	249	235	255	283	290	350	378
	PNS	/	/	219	210	220	240	265	272	320
Temps d'Écoulement (sec)	PC	/	/	8.58	4.30	4.05	3.52	3.42	4.00	4.21
	PNS	/	/	9.95	3.87	3.55	3.20	2.75	2.78	3.30

(/) Pas d'étalement (mortier ferme)

On constate d'après le tableau 4.1, que le mortier avec un rapport S/M de 0.50 a donné une meilleure fluidité par rapport aux autres mortiers (rapports 0.55 et 0.60). Avec le rapport S/M = 0.60, le mortier était trop sec même avec l'augmentation du dosage en superplastifiants jusqu'à 1.8%. Avec le rapport S/M = 0.55, la fluidité était insuffisante. Par conséquent la confection d'un mortier autoplaçant n'est pas envisageable avec un rapport S/M = 0.60 et 0.55.

La diminution du rapport Sable/Mortier mène à une réduction du volume de sable, et par conséquent l'augmentation du volume de la pâte de ciment, ce qui contribue significativement à l'amélioration de la fluidité. Westerholm et al [163] affirment que la large quantité de sable fin dans le mélange de mortier influe sur la rhéologie de ce dernier, elle augmente le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique. Fang et al [164] ont trouvé que, pour la fabrication d'un béton autoplaçant à haute performance, il est préférable de prendre le rapport Sable/Mortier entre 45 et 48%. Spengler et Schiessl [165] ont pu obtenir un bon BAP quatre fois plus riche en sable qu'en gravier (sable 80% et gravier 20%) avec un

rapport E/C égale à 0,5. Par conséquent, Pour les différents essais de béton, le rapport S/M a été fixé à 0.50.

4.3 Effet des Superplastifiants sur le mortier frais

Le superplastifiant ajouté au mortier se divise en trois parties. La première partie est consommée par les réactions chimiques, la deuxième partie est adsorbée sur la surface des particules de ciment, et la troisième partie reste dans la phase aqueuse. Une fois suffisamment de polymères ont été ajoutés pour satisfaire la consommation du polymère, le système est ainsi saturé en polymère [166]. À partir des essais sur mortier, on optimise le rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L) et par conséquent fixe ce rapport au niveau des essais sur béton. Cette optimisation a été faite à partir des deux essais sur mortier, la mesure d'étalement au mini-cône et la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour mortiers.

4.3.1 Etalement au mini-cône pour les mortiers

La figure 4.1 montre l'effet des deux superplastifiants PC et PNS sur l'étalement des mortiers au mini-cône. On observe que les dosages de Sp/L = 1.6% et 1.8% (pour le superplastifiant PC), et Sp/L = 1.8% et 2% (pour le superplastifiant PNS) permettent d'atteindre des valeurs d'étalement acceptables (entre 250 et 300 mm) selon Domone et Jin [51]. Les dosages supérieures à 2% pour PC et 2.2% pour PNS sont rejetés car ils ont accusé un grand ressuage et une grande ségrégation visibles à l'œil nue.

La figure 4.1 montre aussi que les valeurs d'étalement des mortiers avec PC sont plus grandes que celles des mortiers avec PNS. Des mélanges de béton donnant des étalements entre 650 et 750 mm ont été obtenus à partir de mortiers ayant des étalements entre 300 et 320 mm [62]. Sugamata et al [167] ont trouvé que les superplastifiants ayant un pourcentage élevé de groupes carboxyles, avec lesquels ils sont absorbés, produisent une réduction importante de viscosité, car ils augmentent le degré de dispersion des particules de poudres pour libérer l'eau emmagasinée dans les agglomérations. Ce qui explique la grande ouvrabilité provoquée par le superplastifiant PC qui est à base de polycarboxylate.

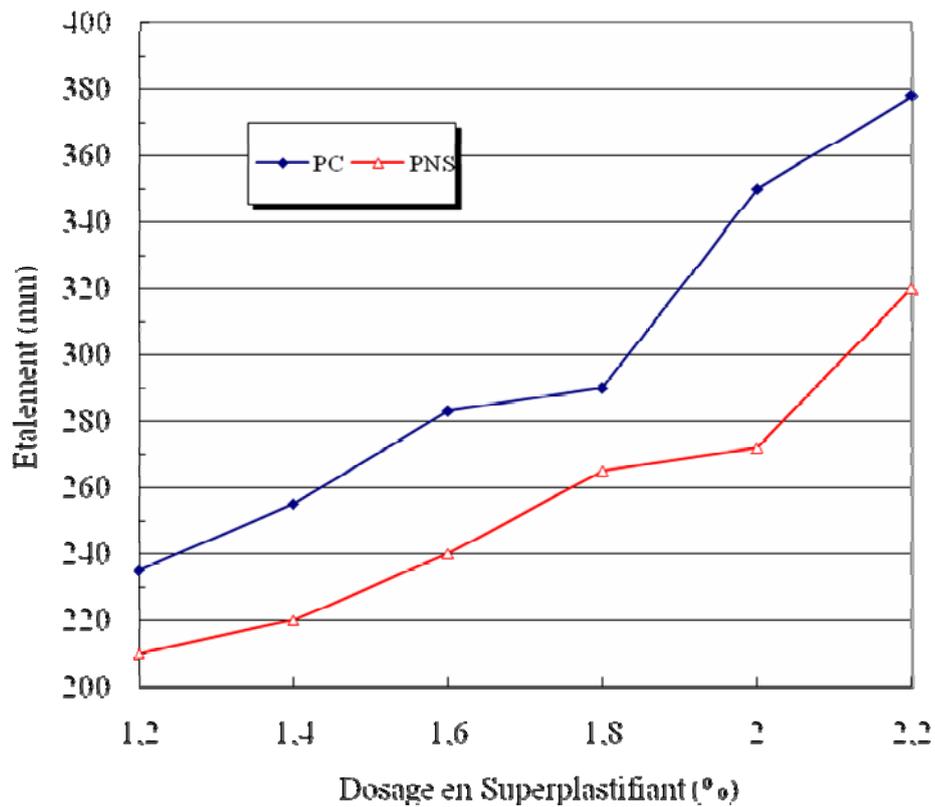


Figure 4.1 : Etalement en fonction du dosage en superplastifiant

4.3.2 Temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour mortiers

La figure 4.2 montre l'effet des deux superplastifiants PC et PNS sur le temps d'écoulement des mortiers en utilisant l'entonnoir en V pour mortiers.

Les dosages 1,6 et 1,8% pour PC, et 1,8 et 2% pour PNS ont montré les temps d'écoulement des mortiers, à l'entonnoir en V, les plus faibles.

Pour les deux types de superplastifiants ces temps d'écoulement sont compris dans l'intervalle de 2 à 10 secondes proposé par Domone et Jin [51].

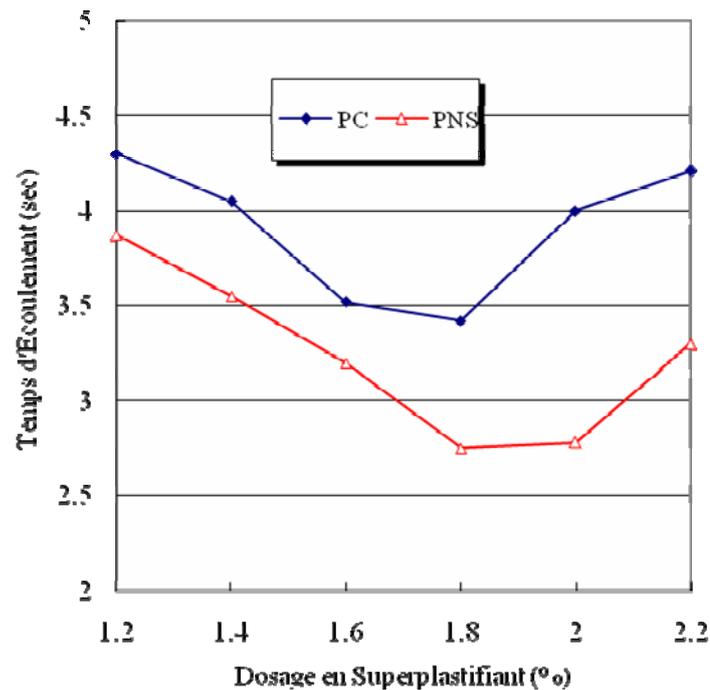


Figure 4.2 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant

Les deux essais sur mortiers, d'étalement et du temps d'écoulement, nous permettent de faire les conclusions suivantes:

- En utilisant le superplastifiant PC, le pourcentage optimal Sp/L à utiliser dans les mélanges de béton est de 1.6%.
- En utilisant le superplastifiant PNS, le pourcentage optimal Sp/L à utiliser dans les mélanges de béton est de 1.8%.
- Les mélanges de mortier avec PC présentent une meilleure ouvrabilité que ceux avec PNS. Ceci était prévisible dans la mesure où le superplastifiant à base de polycarboxylate (PC) appartient à la nouvelle génération des superplastifiants.

4.3.3 Effet du Laitier sur la Chaleur d'Hydratation

La figure 4.3 représente la variation de la température en fonction du temps, jusqu'à 72 heures, pour les cinq cas de contenance du laitier dans le mélange.

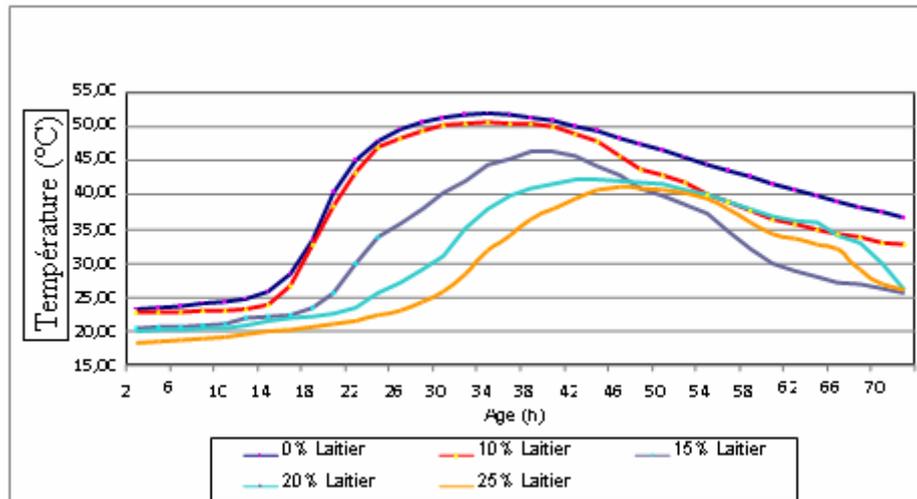


Figure 4.3 : Variation de la Température en fonction de l'âge du mortier

Sur le graphe, nous constatons que température atteint son maximum de 52 et 50,6°C respectivement pour 0 et 10% de laitier, à environ 32 heures après malaxage. Dans le cas du mélange à 15% de laitier, le maximum est de 46,4°C et il est atteint après 38 heures. On remarque que l'introduction du laitier à partir de 15% et au-delà retarde et diminue la température maximale à l'intérieur du mélange. On remarque aussi que jusqu'à 18 heures après malaxage, la température est à peine à 23,4°C ce qui minimise le risque de dégagement de chaleur durant les premières heures.

La figure 4.4 montre la variation de la quantité de chaleur dans le mortier en fonction du temps. La différence des valeurs de quantité de chaleur est évidente entre le mélange de référence (à 0% de laitier) et les autres mélanges qui contiennent du laitier jusqu'à l'âge de 36 heures puis cette différence commence à s'atténuer pour devenir presque nulle 72 heures après le malaxage.

Paine et al [168] ont trouvé des résultats similaires. Ils ont montré que la chaleur d'hydratation augmente avec l'augmentation de la finesse du laitier et qu'elle diminue avec l'augmentation du pourcentage de laitier présent dans le mélange. La faible chaleur d'hydratation des ciments au laitier montre que ces derniers peuvent être utilisés dans des structures à grandes masses de béton tel que les murs de soutènement.

Kadri et Duval [169] ont démontré qu'à un premier stade les particules fines accélèrent le taux d'hydratation, ainsi plus la finesse est grande plus le taux de la chaleur d'hydratation est rapide, et cette réactivité conduit à une augmentation de la résistance à la compression.

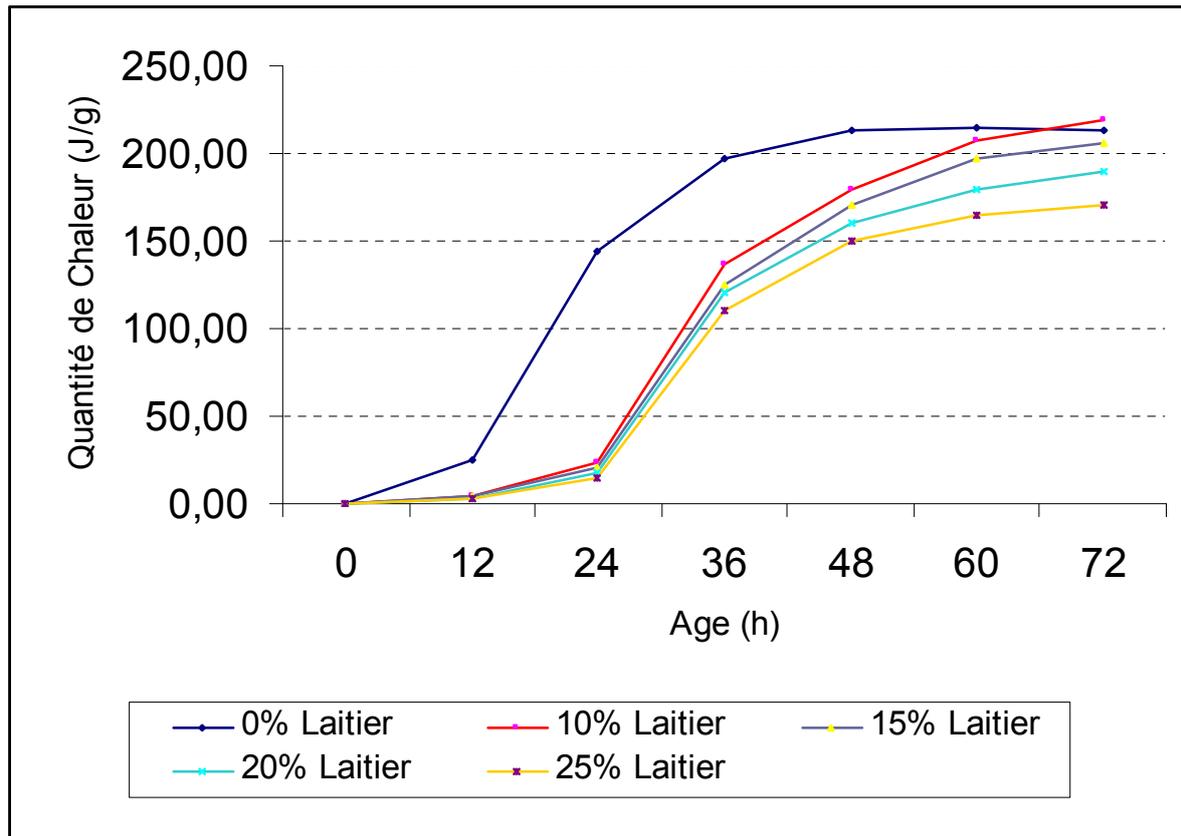


Figure 4.4 : Quantité de Chaleur en fonction de l'âge du mortier

Gruskovnjak et al [170] ont trouvé que la composition chimique du laitier a une large influence sur la quantité des hydrates formés et donc sur le volume du laitier hydraté.

4.3.4 Effet du Laitier sur le besoin en eau

Pour voir l'effet du laitier sur le besoin en eau, des essais sur mortiers à étalements constants de l'ordre de 283mm ont été réalisés pour les dosages en laitier de 0%, 10%, 15%, 20% et 25% avec le superplastifiant du type PC. Le tableau 4.2 montre les résultats de demande en eau en fonction de la teneur en laitier.

Tableau 4.2 : Résultats de demande en eau en fonction de la teneur en laitier [171]

Laitier (%)	0	10	15	20	25
E/C	0.4	0.39	0.37	0.35	0.34

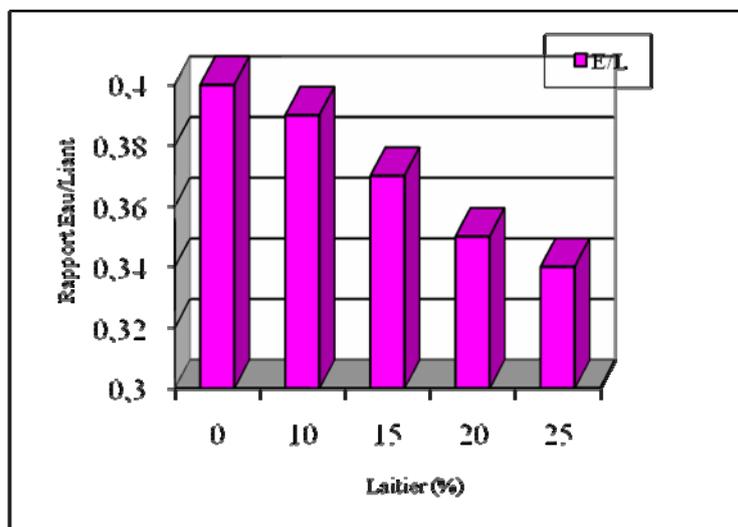


Figure 4.5 : Effet du laitier sur le dosage en eau du mortier

La figure 4.5 montre que le rapport E/C diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier. On constate que pour les mortiers dont la teneur en laitier est de 10%, 15%, 20% et 25%, il y a eu une diminution du dosage en eau de 2.5%, 7.5%, 12.5% et 15% par rapport au mortier de référence (0%L). Cela signifie que pour une fluidité donnée la teneur en laitier a un effet direct sur la demande en eau du mélange. En effet, les grains du laitier se caractérisent par des surfaces vitreuses lisses à faible taux d'absorption ce qui permet le glissement intergranulaire dans le mortier et par conséquent une faible demande en eau.

4.4 Effet du Laitier sur l'ouvrabilité des BAP à l'Etat frais

L'effet du laitier sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants à l'état frais est analysé à travers une série d'essais particuliers aux BAP, qui nous permettent d'étudier la variation de l'ouvrabilité en fonction du dosage du mélange en laitier. Nous rappelons que le laitier a été introduit par substitution au ciment. Il est important dans cette partie de contrôler surtout la ségrégation et le ressage. Le tableau 4.3 donne la composition des cinq (5) bétons testés avec comme béton de référence le BAP1 qui contient 0% de laitier.

Tableau 4.3 : Composition des BAP testés

		BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	
Ciment (kg/m ³)		465	420	397	374	352	
Laitier	(%)	0	10	15	20	25	
	(kg/m ³)	0	44	66	88	110	
Gravier (3/8) (kg/m ³)		280	280	280	280	280	
Gravier (8/15) (kg/m ³)		560	560	560	560	560	
Sable (kg/m ³)		867	867	867	867	867	
Eau (kg/m ³)		185	185	185	185	185	
Superplastifiant	PC	(%)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
		(kg/m ³)	7.44	7.42	7.40	7.39	7.38
	PNS	(%)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
		(kg/m ³)	8.37	8.35	8.33	8.32	8.32

Le tableau 4.4 donne les résultats des différents essais sur l'ouvrabilité des cinq BAP à l'état frais.

Tableau 4.4 : Résultats d'essais d'ouvrabilité

Laitier (%)			0	10	15	20	25
Essai d'Étalement	Temps d'Écoulement T50 (sec)	PC	1.25	1.22	0.66	1	1.2
		PNS	1.4	1.07	0.82	1.1	1.3
	Étalement S (mm)	PC	630	660	745	770	787
		PNS	500	580	600	660	700
Essai J-Ring	Temps d'Écoulement T50 _J (sec)	PC	2.3	2	1.3	2.6	3.5
		PNS	2.6	2.3	1.8	2.8	3.9
	Étalement S _J (mm)	PC	570	570	630	660	670
		PNS	480	550	595	620	630
	Différence d'Hauteurs B _J (mm)	PC	9.75	9.25	7.75	9.75	18.25
		PNS	11.23	10.6	8.8	11	19.01

Essai V-Funnel	Temps d'Écoulement (sec)	PC	7	6	4	9.14	14.8
		PNS	10	7.5	5.2	9.6	13.8
Essai de ségrégation sur Tamis de 5 mm	Mortier passant à travers le Tamis (%)	PC	4.47	5.93	9.975	16.9	22.87
		PNS	3.84	5	8.9	17.5	25.2
Essai L-Box	Rapport des Hauteurs (H2/H1)	PC	0.85	0.87	0.91	1	1
		PNS	0.79	0.83	0.86	0.95	0.98
Essai U-Box	Hauteur de Remplissage (mm)	PC	325	350	390	305	230
		PNS	285	335	375	285	207

4.4.1 Étalement et Temps T50 au cône d'Abrams

La figure 4.6 montre l'effet des deux superplastifiants PC et PNS sur l'étalement. On note que les valeurs d'étalement, pour les mélanges de béton confectionnés avec le superplastifiant PC, sont plus élevées que celles pour les mélanges avec le superplastifiant PNS. On observe également sur cette figure, pour les deux superplastifiants, que la pente du graphe diminue à partir de plus de 15% de laitier, ce qui nous permet de conclure que ce pourcentage est optimal du point de vue ouvrabilité. Aarre et Domone [172] proposent un étalement entre 650 mm et 700 mm pour obtenir un bon béton Autoplaçant.

Li et Ding [173] ont trouvé que l'incorporation du laitier à raison de 20 à 30% dans le mortier améliore son ouvrabilité. Necira et al [174] ont eu un étalement d'environ 680 mm avec 40% de laitier et un étalement d'environ 625 mm pour 15% de laitier dans le mélange, contre 750 mm dans notre cas.

Shi et al [175] ont montré que la fluidité du béton augmente considérablement lorsque des poudres vitreuses sont partiellement substituées au ciment. Dans leurs travaux sur des mortiers, ils ont substitué le ciment par du laitier jusqu'à 50%, ils ont confirmé que l'étalement augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier.

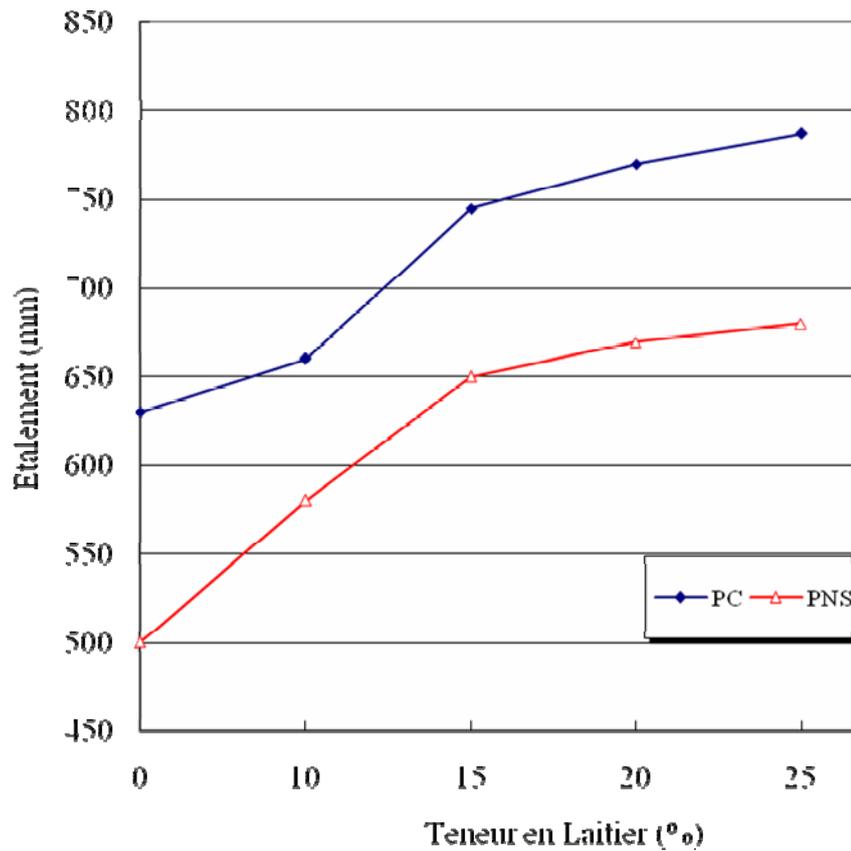


Fig 4.6 : Etalement en fonction de la teneur en Laitier

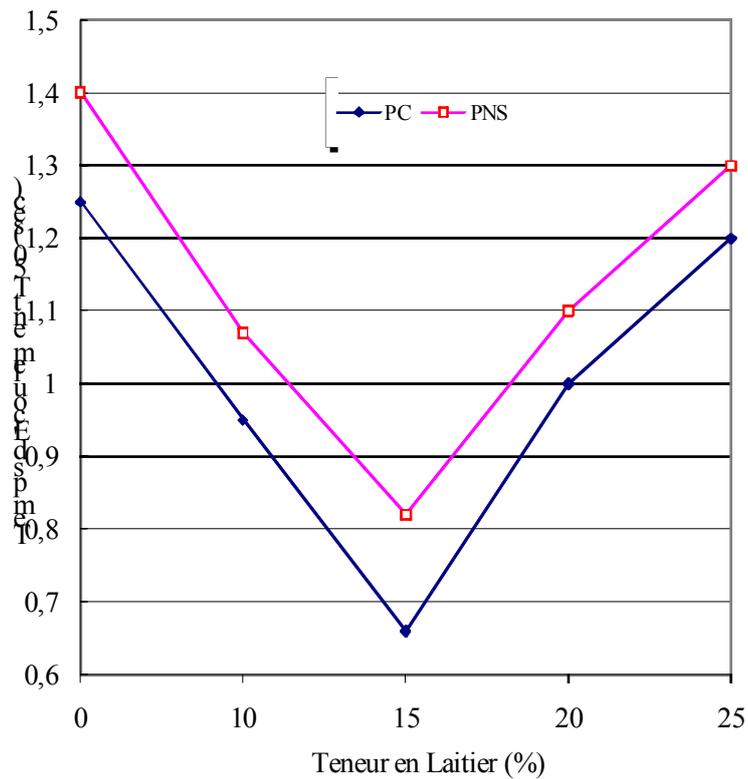


Fig 4.7 : Temps d'Écoulement T50 en fonction de la teneur en Laitier

La figure 4.7 montre l'effet du laitier sur le temps d'écoulement T50, où 15% de laitier donne le temps d'écoulement T50 le plus bas (0,65 à 0,8 sec) en utilisant les deux types de superplastifiants, le meilleur temps étant obtenu avec le superplastifiant PC. Nous remarquons ici que les valeurs de T50 sont plus basses que celles proposées par Aarre et Domone [172] (2 à 4 sec). Ceci peut être expliqué par les valeurs d'étalement élevées (Figure 4.6).

4.4.2 Temps d'écoulement par l'essai d'Entonnoir en V (V-Funnel)

Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du pourcentage de laitier sont représentés sur la figure 4.8. Cet essai indique la capacité de remplissage du mélange. Les valeurs sont acceptables jusqu'à 20% de laitier pour les mélanges de béton confectionnés avec les deux types de superplastifiants. Domone [35] propose des valeurs entre 2 et 10 secondes. L'optimum est obtenu à 15% de laitier pour le mélange contenant le superplastifiant PC.

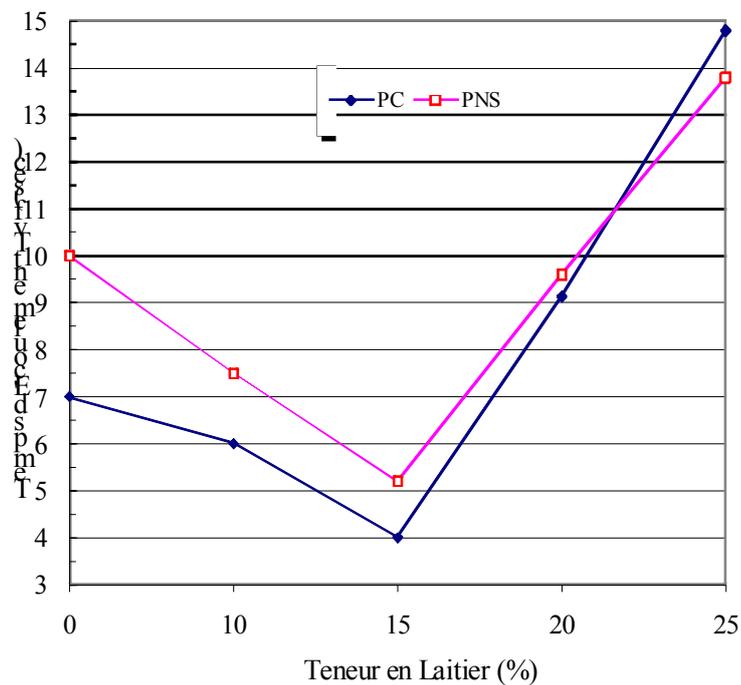


Fig 4.8 : Temps d'Écoulement à l'Entonnoir en V en fonction de la teneur en Laitier

Sonebi et Bartos [92], ont pu obtenir un temps T50 inférieur à 2 secondes avec un mélange de BAP contenant environ 40% de pâte en plus par rapport à un béton ordinaire.

4.4.3 Rapport H_2/H_1 de l'essai de la Boîte en L (L-Box)

L'essai de la boîte en L (L-Box) donne une bonne appréciation de la capacité de remplissage, de passage et de la résistance à la ségrégation. La figure 4.9 montre la variation du rapport H_2/H_1 en fonction du pourcentage de laitier, en utilisant les deux types de superplastifiants. Pour les deux 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 certes augmente mais les mélanges accusent une certaine ségrégation.

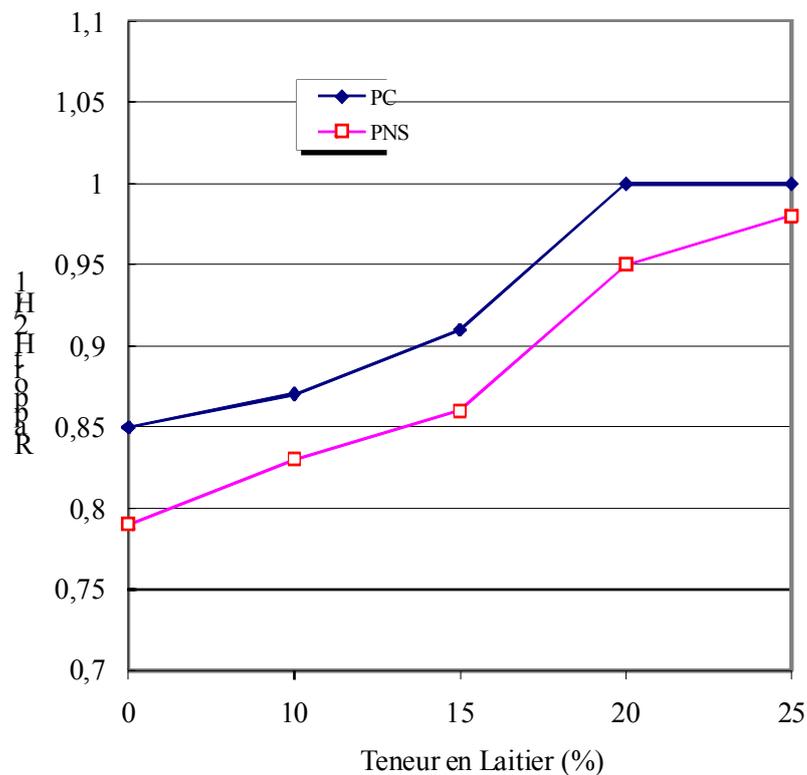


Figure 4.9 : Rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en Laitier

Borsoi et al [28] ont trouvé que 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.

Necira et al [174] ont trouvé un rapport H_2/H_1 égale à environ 0,78 contre 0,91 dans notre cas, avec le même pourcentage de laitier présent dans le mélange (15%).

Sonebi et Bartos [92] ont trouvé un rapport H_2/H_1 supérieur à 0,80 sans blocage. Un peu plus tard, Sonebi et al [176] 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.

Récemment Nguyen et al [177] ont démontré qu'il faut ouvrir la trappe doucement pour que le résultat de ce test ne dépende que du seuil de cisaillement. Ils donnent la relation suivante qui exprime le rapport H_2/H_1 en fonction du seuil de cisaillement.

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{2h_{avg} - (h_1 - h_2)}{2h_{avg} + (h_1 - h_2)} \cong \frac{\rho g - 100\tau_0}{\rho g + 100\tau_0} \quad (4.1)$$

4.4.4 Étalement, Temps T_{50J} et Différence de hauteur B_J au cône d'Abrams en présence du J-Ring

L'essai J-Ring est facile à utiliser et fournit une bonne mesure de la perte d'ouvrabilité en présence d'obstacles. Pour cela Daczko [178] recommande de faire la comparaison entre les mesures d'étalement sans et en présence du J-Ring. Ajouté à cela nous avons jugé utile d'étendre cette comparaison au temps d'écoulement T_{50} .

(a) Étalement

Les figures 4.10 et 4.11 montrent la variation de l'étalement sans et avec le J-Ring en utilisant les deux superplastifiants PC et PNS respectivement. Pour les deux superplastifiants, on remarque la nette différence des valeurs d'étalement des mélanges entre l'absence et la présence du J-Ring. On note le même comportement des mélanges avec l'augmentation de la teneur en laitier. La ségrégation est présente et visible par le blocage des gros granulats à l'intérieur de l'anneau (J-Ring) pour les teneurs en laitier dépassant 15%.

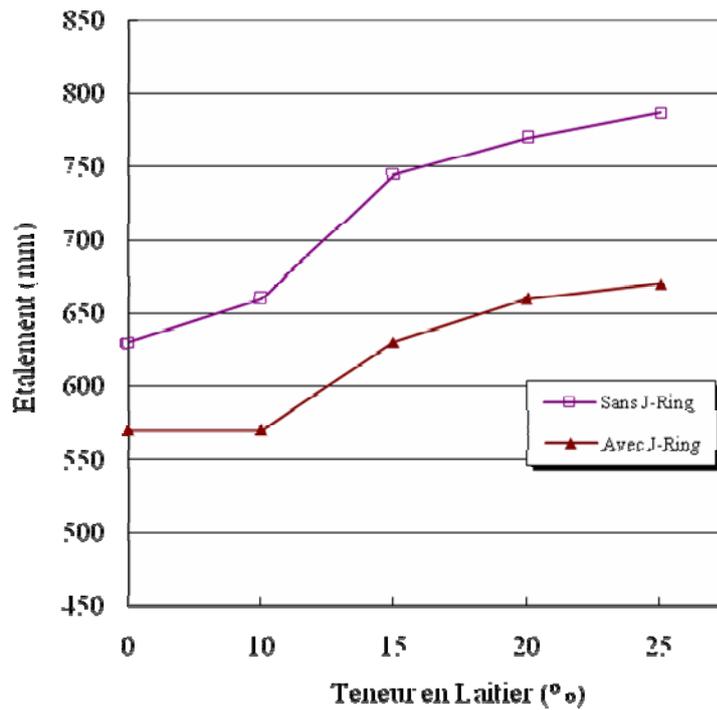


Figure 4.10 : Etalement sans et avec J- Ring avec PC en fonction de la teneur en Laitier

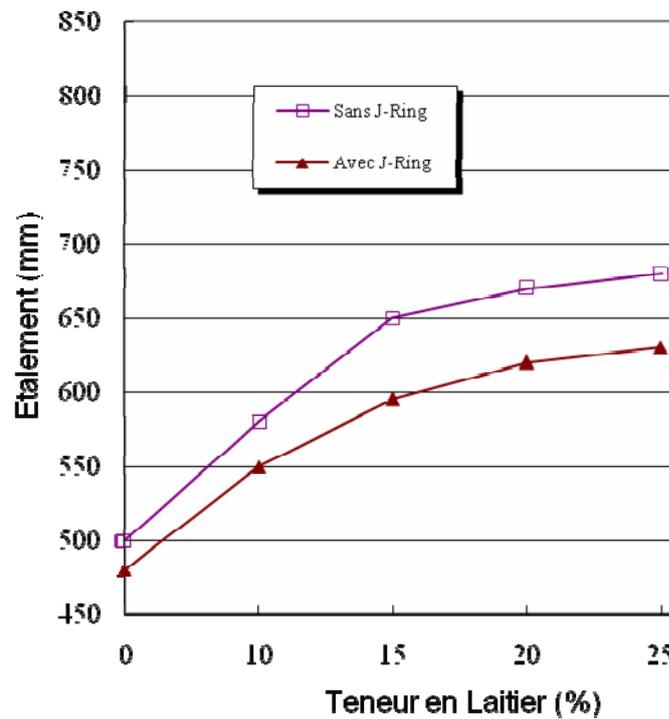


Figure 4.11 : Etalement sans et avec J-Ring avec PNS en fonction de la teneur en Laitier

(b) Temps d'Écoulement T50

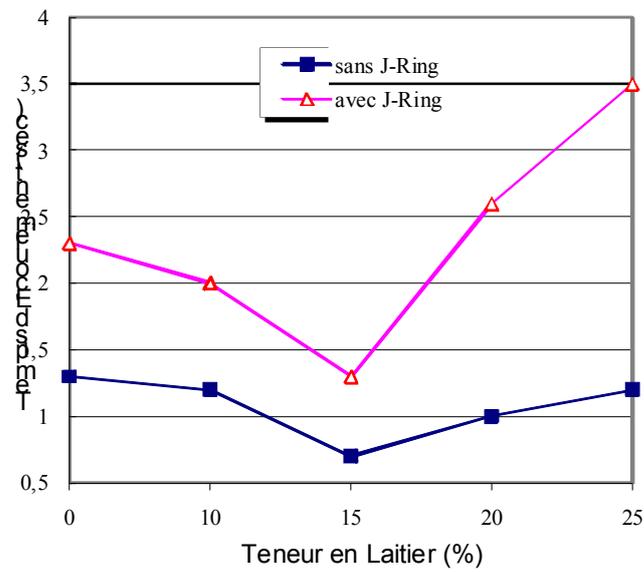


Figure 4.12 : T50 sans et avec J-Ring avec PC en fonction de la teneur en Laitier

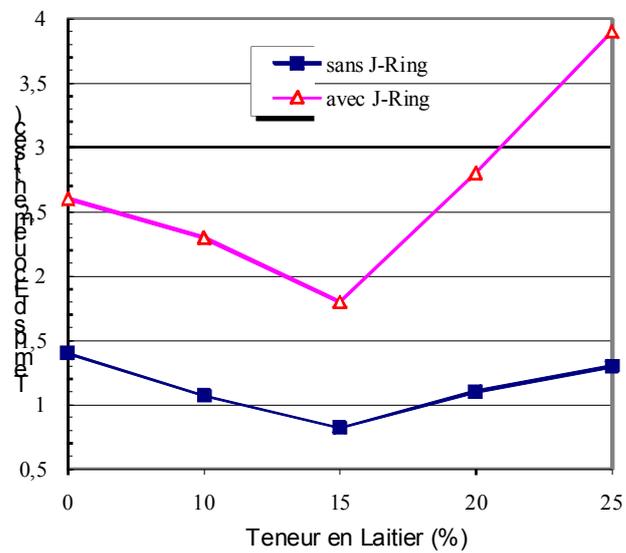


Figure 4.13 : T50 sans et avec J-Ring avec PNS en fonction de la teneur en Laitier

Les figures 4.12 et 4.13 montrent la variation du temps d'écoulement T_{50} , sans et avec le J-Ring, en utilisant les deux superplastifiants PC et PNS respectivement. Le temps d'écoulement T_{50} en présence du J-Ring accuse un retard considérable par rapport à celui en l'absence du J-Ring et ceci pour les deux types de superplastifiants. Ce temps est minimal dans le cas de la teneur optimale en laitier qui est de 15%.

(c) Différence de hauteurs au cône d'Abrams

La figure 4.14 montre la variation de la différence de hauteurs en présence du J-Ring en fonction de la teneur en laitier. La mesure de la différence de hauteurs se fait uniquement en présence du J-Ring et on compare les hauteurs des mélanges à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring. Cette différence de hauteurs diminue avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange jusqu'à 15%, valeur optimale, ceci s'explique par la fluidité que donne le laitier au mélange. Au-delà de 15% de laitier dans le mélange, cette différence augmente fortement à cause de la présence de ségrégation dans le mélange. Dans la littérature la différence de hauteurs ne doit pas dépasser 10 mm [157].

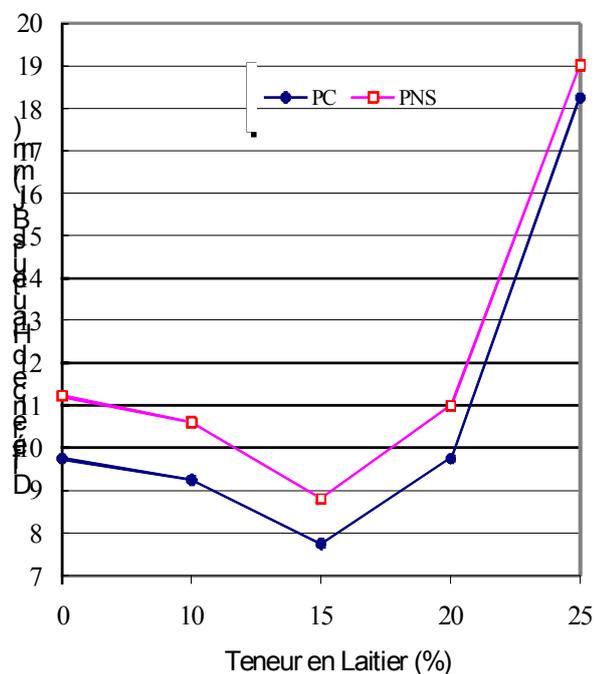


Figure 4.14 : Différence de hauteurs B_j en fonction de la teneur en laitier

4.4.5 Hauteur de remplissage à la boîte en U (U-Box)

La figure 4.15 donne les valeurs des hauteurs de remplissage à la boîte en U (U-Box) en fonction de la teneur en laitier. On note que les hauteurs de remplissage sont plus élevées pour les mélanges contenant le superplastifiant PC que celles contenant le superplastifiant PNS. Ceci s'explique par la meilleure efficacité du PC par rapport au PNS, avec des valeurs acceptables au dessus de 300 mm selon Efnarc [60]. Pour les deux types de superplastifiants, la meilleure hauteur est enregistrée pour 15% de laitier présent dans le mélange.

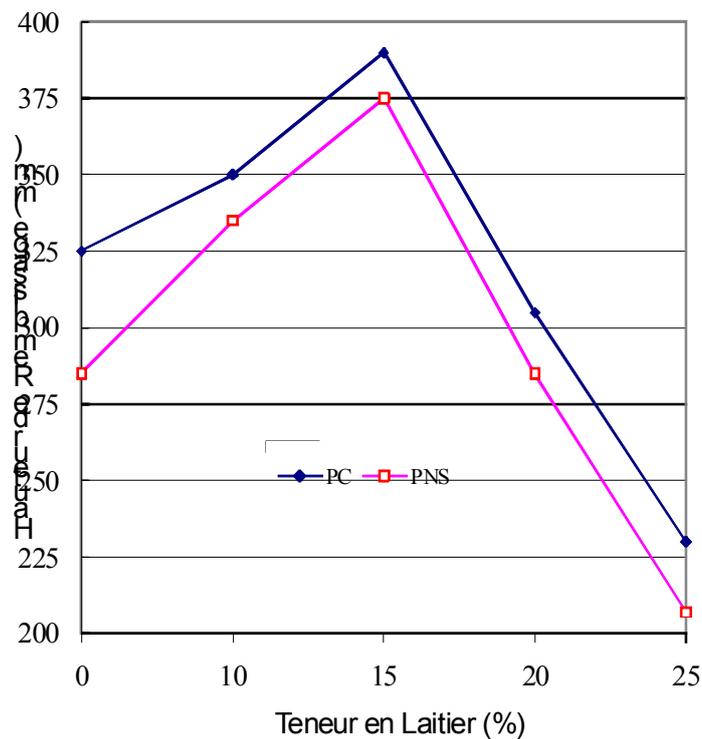


Figure 4.15 : Hauteur de remplissage à la boîte en U en fonction de la teneur en Laitier

4.4.6 Résistance à la Ségrégation par Tamisage

La figure 4.16 montre les résultats des pourcentages de laitance passant à travers un tamis de 5 mm pour déterminer le degré de ségrégation des mélanges en fonction de la teneur en laitier. D'après EUGC [179] une proportion de 5 à 15% de l'échantillon passant à travers le tamis donne une résistance optimale à la ségrégation. D'après cette figure on peut noter que

pour les mélanges de béton avec 10 et 15% de laitier, pour les deux superplastifiants, ces conditions sont satisfaites, mais au-delà de 15% de laitier, la présence de ressuage et de ségrégation est confirmée.

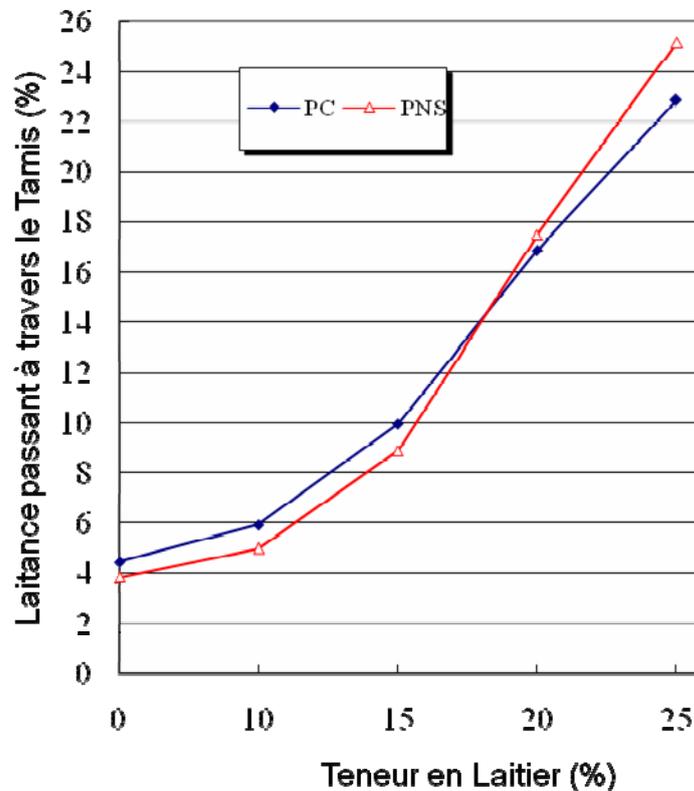


Figure 4.16 : Résistance à la Ségrégation au Tamis en fonction de la teneur en Laitier

Necira et al [174] ont trouvé un pourcentage de laitance, passant à travers le tamis, égale à environ 9 contre 10 dans notre cas, avec le même pourcentage de laitier (15%).

Safawi et al. [180] ont montré que le temps d'écoulement au V-Funnel est un outil adapté pour décrire la tendance de la ségrégation. Ainsi pour de très faibles temps d'écoulement (inférieures à 2 secondes) la tendance au béton à ségréguer est très élevée, ce qui implique que les mélanges à faible viscosité sont facilement ségrégués.

4.4.7 Perte d'Ouvrabilité

La figure 4.17 montre la perte d'ouvrabilité à 0, 30, 60 et 90 minutes après malaxage pour les mélanges contenant 0, 10 et 15% de laitier. On doit signaler ici que la perte d'ouvrabilité est elle-même un paramètre rhéologique, elle donne la déformation du mélange

en fonction du temps. Les mélanges de béton contenant le superplastifiant PNS ont perdu leur ouvrabilité rapidement. D'ailleurs, même après 30 minutes, ils ne sont plus considérés comme des BAP. Par contre les mélanges contenant le superplastifiant PC et spécialement celui contenant 15% de laitier, sont restés ouvrables jusqu'à 60 minutes après malaxage.

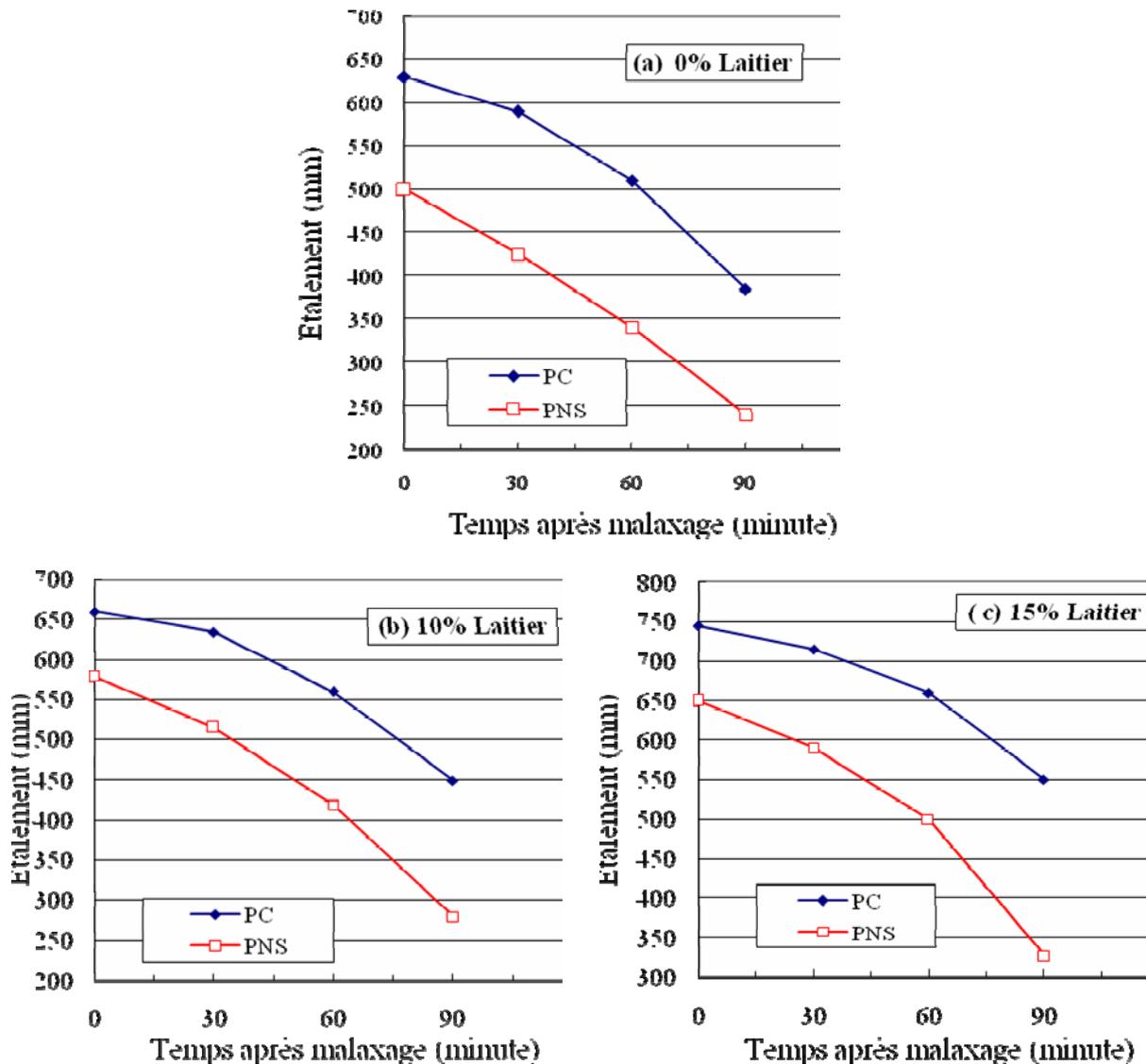


Fig 4.17 (a-c) : Perte d'Ouvrabilité en fonction du temps

Sonebi et Bartos [92] estiment la perte d'ouvrabilité à 70 minutes après malaxage à moins de 10%.

L'analyse des pentes de perte d'ouvrabilité des mélanges contenant le superplastifiant PC démontrent, que la pente est moins importante pour les mélanges avec 15% de teneur en laitier que pour les mélanges sans ou avec 10% de laitier seulement (Figure 4.18). Donc on peut conclure que la perte d'ouvrabilité est lente et qu'à 60 minutes après malaxage nous

avons toujours un bon BAP que l'on peut mettre en place facilement même si on a besoin de le transporter. Cet étalement est à 660 mm et par conséquent dans la fourchette des BAP.

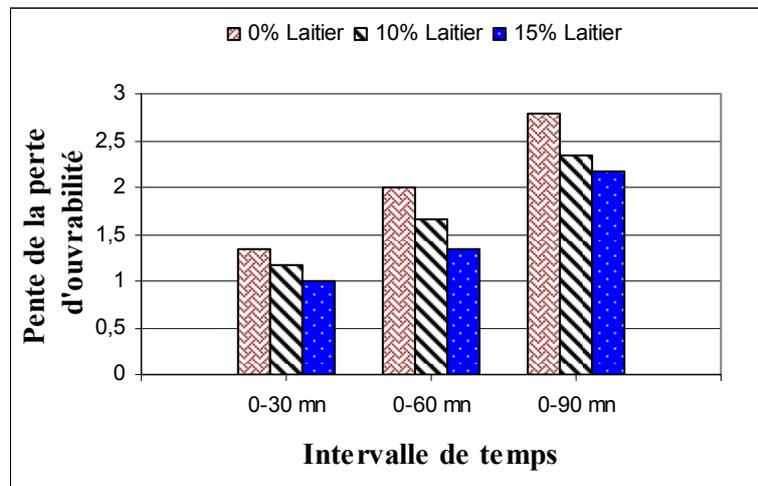


Figure 4.18 : Variation de pente de perte d'ouvrabilité en fonction du temps

Avec une substitution du ciment par du laitier à 40%, Jin et Domone [64] ont enregistré un étalement d'environ 600 mm seulement et une perte d'ouvrabilité, 30 minutes après malaxage, donnant un étalement d'environ 330 mm.

Selon Rouis [181], la substitution du ciment par du laitier a diminué l'activité chimique du liant, ce qui a prolongé la période latente dans laquelle l'effet stérique causé par le superplastifiant était toujours présent. Par la suite, on commence à perdre l'ouvrabilité, cette perte est causée essentiellement par le raidissement du béton, ce raidissement correspond à la formation de points de colle (formation des hydrates) de plus en plus nombreux entre les grains (Figure 4.19). L'augmentation de ces points de colle durant la période latente va faire en sorte que la pâte perd sa fluidité et donc le mouvement du béton est de plus en plus empêché.

D'après Ohno et al. [182] la perte d'ouvrabilité est causée par la dispersion de l'adjuvant et la quantité libre d'eau dans le mélange. Brooks et al. [22] ont trouvé que l'influence de l'introduction de 40% de laitier dans le mélange provoque un grand retard de prise dans ce dernier.

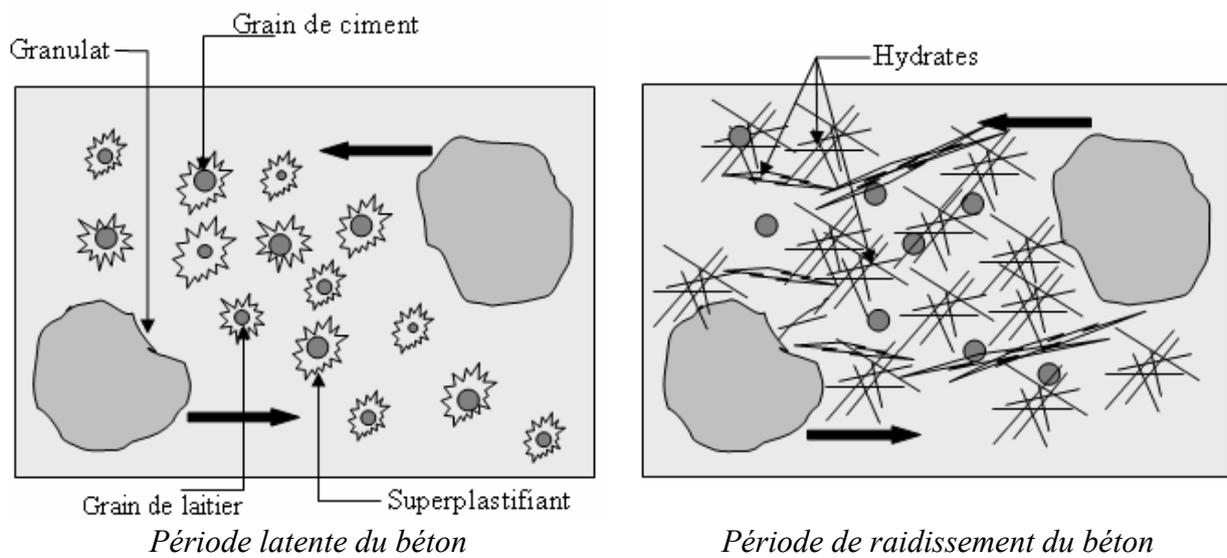


Figure 4.19 : Effet du temps sur la perte d'ouvrabilité des BAP

A partir de tous ces essais d'ouvrabilité, on peut confirmer l'efficacité du superplastifiant PC à base de polycarboxylate par rapport au superplastifiant PNS à base de naphthalène sulfonate. Takada et Walraven [183] ont eu une conclusion similaire.

4.5 Effet du Laitier sur la Rhéologie des BAP

Le tableau 4.5 donne les résultats de l'essai au cône d'Abrams modifié permettant de mesurer l'affaissement et le temps d'affaissement partiel T_{100} et de calculer le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique pour les cinq BAP. Le tableau donne aussi les résultats de temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de l'essai de la boîte en L (L-Box).

Tableau 4.5 : Résultats d'essais de Rhéologie des BAP

Pourcentage du Laitier dans le mélange		Grandeurs Rhéologiques					
		Essai du Cône d'Abrams modifié				Essai L-Box	
		Affaissement Total S (mm)	Temps d'Affaissement partiel T ₁₀₀ (sec)	Seuil de cisaillement τ_0 (Pa)	Viscosité plastique μ (Pa.s)	T ₂₀ (sec)	T ₄₀ (sec)
0%	PC	260	1.15	484.8	249.8	1.25	2.00
Laitier	PNS	256	1.25	512.0	258.7	1.28	2.20
10%	PC	261	1.02	477.9	224.2	1.15	1.89
Laitier	PNS	257	1.11	505.2	232.6	1.22	2.08
15%	PC	262	0.79	471.1	175.6	1.1	1.84
Laitier	PNS	258	0.95	498.4	201.5	1.2	2.02
20%	PC	265	0.71	450.7	163.3	1.13	2.03
Laitier	PNS	260	0.87	484.7	189.0	1.25	2.29
25%	PC	268	0.66	430.2	156.8	1.15	2.32
Laitier	PNS	262	0.81	471.1	180.1	1.35	2.51

4.5.1 Mesure d'Affaissement S au cône d'Abrams modifié

La figure 4.20 montre la variation de l'affaissement total S en fonction de la teneur en laitier présent dans le mélange. Elle montre clairement que, pour les deux types de superplastifiants, l'affaissement total augmente quand le pourcentage de laitier augmente avec la même pente jusqu'à 15% de laitier, au-delà, la pente augmente considérablement, ceci est dû à la présence de ségrégation dans le mélange.

Les résultats obtenus par Björnström et Chandra [49] montrent que la composition chimique du ciment, comme les teneurs en C₃A et en sulfate, ainsi que les teneurs en alcali et en chaux, sont des paramètres importants pour le contrôle de la rhéologie des pâtes de ciment. Shi et al [175] ont eu la même tendance de variation de l'affaissement en fonction de la teneur en laitier présent dans le mélange, et comme le montre la figure 4.21, la pente après 20% de teneur en laitier est plus faible.

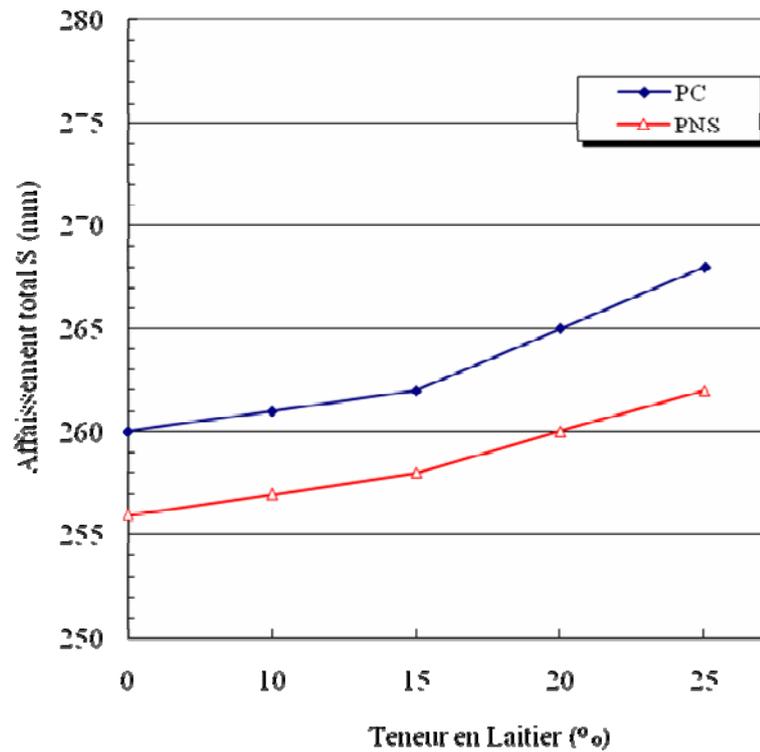


Figure 4.20 : Affaissement S en fonction de la teneur en Laitier

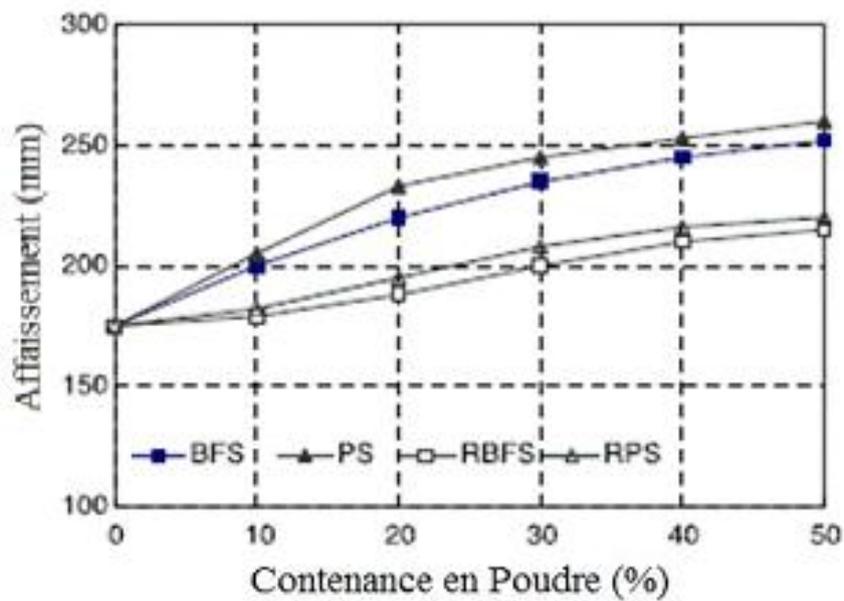


Figure 4.21 : Effet de la teneur en poudre sur l'affaissement [175]

4.5.2 Temps d'affaissement partiel T_{100} au cône d'Abrams modifié

La variation du temps d'affaissement partiel T_{100} au cône d'Abrams modifié en fonction de la teneur en laitier dans le mélange est représentée sur la figure 4.22. T_{100} diminue

rapidement, pour les deux types de superplastifiants, avec l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à 15% puis la pente semble devenir moins accentuée, ce qui veut dire que la vitesse d'écoulement a diminué. Les mélanges contenant le superplastifiant PNS paraissent moins ouvrables et accusent un temps T_{100} plus grand que celui des mélanges contenant le superplastifiant PC.

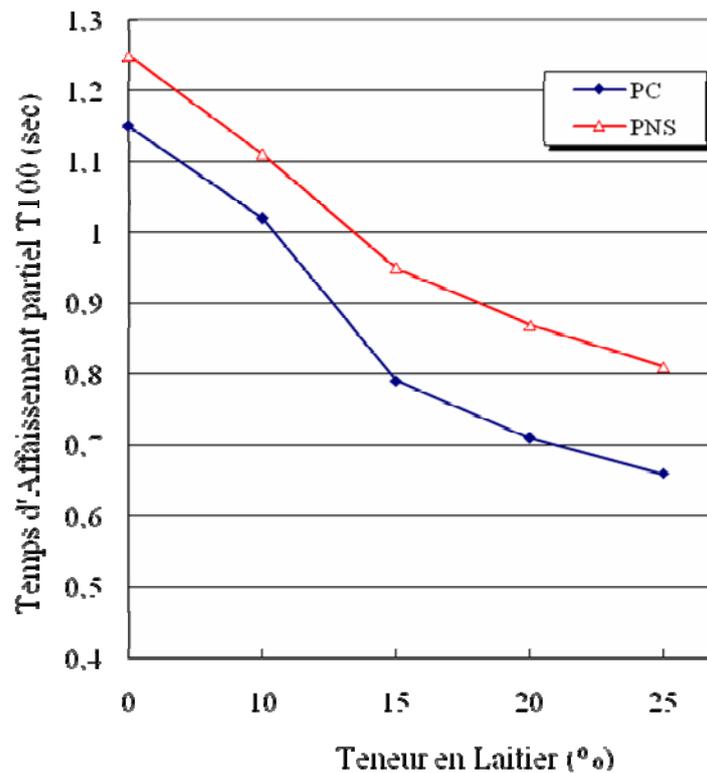


Figure 4.22 : Temps d'Affaissement partiel T_{100} en fonction de la teneur en Laitier

Ferraris et De Larrard [160] ont testé 78 mélanges de béton, entre plastique et fluide, les temps enregistrés varient du plus rapide au plus lent, de 0,63 à 15,97 secondes. Pour un béton ordinaire, un temps élevé exprime la plasticité de ce dernier mais par contre pour un béton très fluide, le cas des BAP, il traduit le risque de ségrégation.

4.5.3 Effet du Laitier sur les Temps d'Écoulement T_{20} et T_{40} de la boîte en L (L-Box)

Les figures 4.23 et 4.24 montrent les variations des temps d'écoulement T_{20} et T_{40} respectivement, de la boîte en L en fonction de la teneur en laitier. On remarque que le temps d'écoulement diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à 15% puis commence à grimper indépendamment de la nature du superplastifiant. Cette augmentation du

temps d'écoulement s'explique par la présence de ségrégation dans le mélange. Les figures 4.22 et 4.23 montrent le même comportement des deux temps d'écoulement T_{20} et T_{40} en fonction de la teneur en laitier. Le meilleur temps est enregistré pour une teneur de 15% puis ce dernier augmente. Cette augmentation s'explique par la ségrégation qui peut être caractérisée par le blocage des gros granulats derrière les bars d'aciers.

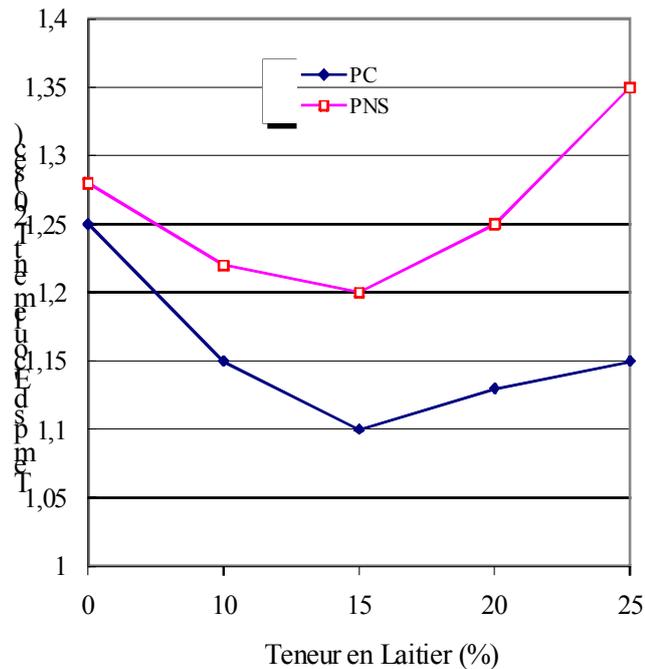


Figure 4.23 : Temps d'écoulement T_{20} en fonction de la teneur en laitier

L'étude des vitesses d'écoulement a montré que pour le mélange contenant le superplastifiant PC avec 15% de laitier, la vitesse d'écoulement entre l'instant d'ouverture de la trappe et la distance de 20 cm (qui correspond au temps T_{20} sec) est de 0,18 m/s. La distance entre 20 et 40 cm (qui correspond au temps T_{40} sec) est parcourue à une vitesse égale à 0,27 m/s. Ceci montre que la vitesse d'écoulement augmente au fur et à mesure que le béton s'étale sur le deuxième compartiment (horizontal) de la boîte en L. Si on compare les vitesses des mélanges contenant le PC avec ceux contenant le PNS, les premières sont plus élevées, ce qui suggère que le PC procure au mélange plus d'ouvrabilité que le PNS.

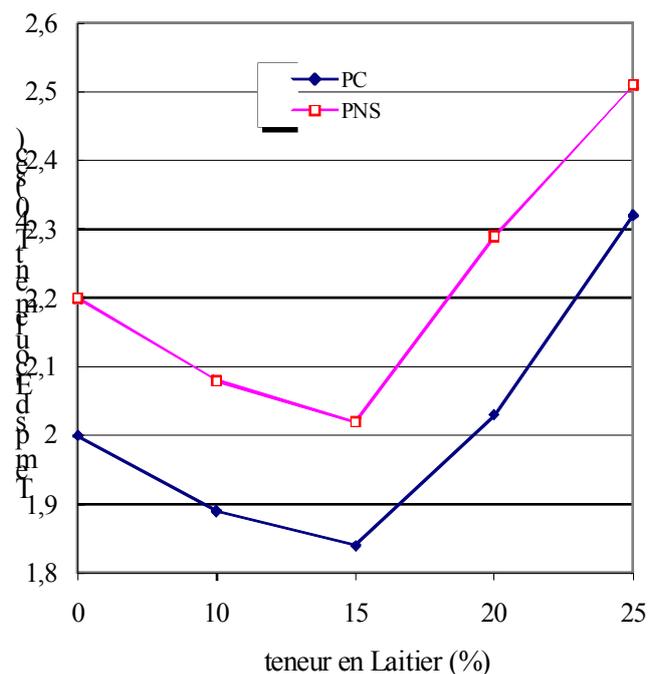


Figure 4.24 : Temps d'écoulement T_{40} en fonction de la teneur en laitier

Nguyen et al [177] ont défini l'essai de la boîte en L (L-Box) comme étant un essai d'étalement sur surface libre à trois dimensions d'un fluide non-newtonien entre obstacles représentés par des bars d'acier. Ils ont conclu qu'il faut que la trappe soit soulevée lentement pour que les résultats de l'essai ne dépendent que des propriétés intrinsèques du mélange (seuil de cisaillement, viscosité plastique, densité) et ne dépendront pas d'autres paramètres externes tels que le taux de soulèvement de la trappe par exemple.

4.5.4 Effet du Laitier sur le seuil de Cisaillement τ_0

La figure 4.25 montre la variation du seuil de cisaillement en fonction de la teneur en laitier. Plus la quantité de laitier est grande plus la valeur du seuil de cisaillement est faible, ceci pour les deux types de superplastifiants, avec un optimum de 15% de laitier dans le mélange.

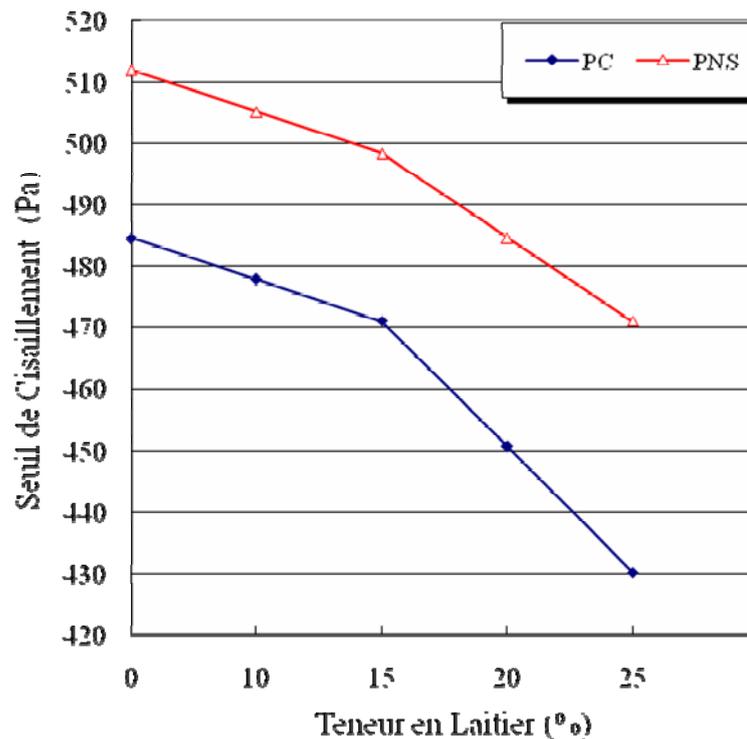


Figure 4.25 : Seuil de Cisaillement en fonction de la teneur en Laitier

D'après Wallevik [184], le seuil de cisaillement est inversement proportionnel à l'affaissement, ce qui confirme ainsi la corrélation linéaire qu'on a trouvé pour nos résultats expérimentaux pour la teneur en laitier comprise entre 0 et 15%.

4.5.5 Effet du Laitier sur la Viscosité μ

La variation de la viscosité plastique en fonction du pourcentage en laitier est donné par la figure 4.26. Pour les deux types de superplastifiants, la viscosité plastique diminue avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange. Les meilleures valeurs enregistrées ont été pour les mélanges contenant le superplastifiant PC et confirment les résultats rapportés par Sicker et al [185].

Gesoglu et Özbay [186] ont rapporté que contrairement à la fumée de silice, l'incorporation des cendres volantes et du laitier dans les mélanges de béton réduisent la viscosité. Shi et al [175] ont trouvé que la fluidité du béton augmente considérablement et la viscosité plastique diminue lorsque des poudres vitreuses sont partiellement substituées au ciment. Ces derniers ont substitué le ciment par du laitier jusqu'à 50%, et ont trouvé que la

viscosité plastique du mortier diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à un taux de substitution de 20%, mais au-delà, la diminution est beaucoup moins importante.

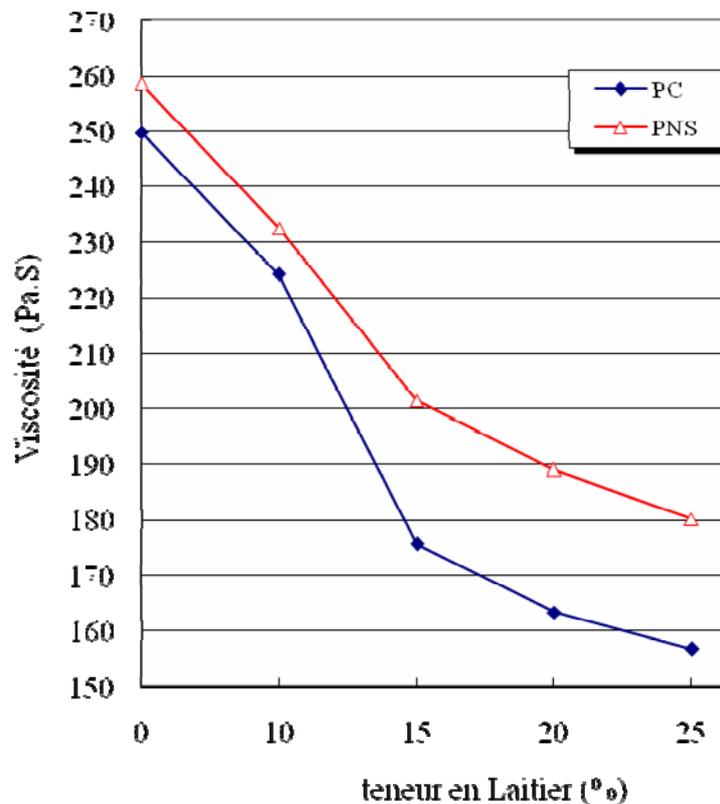


Figure 4.26 : Viscosité Plastique en fonction de la teneur en laitier

Bilgil et al [187] ont trouvé que lorsque le seuil de cisaillement augmente la viscosité plastique augmente et inversement, ceci est le comportement attendu des fluides Binghamiens et confirme la supposition qui stipule que le béton fluide agit comme un fluide non-newtonien. Les auteurs ajoutent que lorsque la viscosité augmente la ségrégation diminue. Reinhardt et Wüstholtz [188] ont rapporté que l'étalement tend à décroître quand le seuil de cisaillement s'accroît et que la viscosité plastique est mieux représentée par le temps d'écoulement T_{500} de l'essai du cône d'Abrams que par le temps d'écoulement T_v de l'essai à l'entonnoir en V (V-Funnel).

Sahmaran et al [189] ont incorporé des cendres volantes au BAP et ont trouvé que la viscosité est proportionnelle aux temps d'écoulement T_{500} de l'essai d'étalement au cône d'Abrams et T_v de l'essai à l'entonnoir en V (V-Funnel), ayant comme équation :

$$T_v = 0,0011.\mu + 6,2970 \quad (4.2)$$

4.6 Effet du Laitier sur les résistances mécaniques des BAP à l'Etat durci

Les essais pour la détermination des résistances mécaniques sont généralement effectués à 24 heures, 3 jours, 7 jours, 28 jours, 56 jours, 90 jours, et 1 an.

Des deux parties, ouvrabilité et rhéologie, on pourra conclure que l'effet du superplastifiant PC à base de polycarboxylate est prépondérant sur celui du superplastifiant PNS à base de polynaphtalène sulfonate. Par conséquent, pour l'étude de l'effet du laitier sur les résistances mécaniques nous n'avons étudié que les mélanges contenant du PC (superplastifiant à base de polycarboxylate). Le tableau 4.6 donne les résultats des essais de résistances à la compression et à la traction pour les cinq BAP étudiés aux ages 7, 28, 56 et 90 jours.

Tableau 4.6 : Résultats des résistances mécaniques en fonction de la teneur en laitier

		Résistances R _c et R _t (en MPa)				
Jours	Nature de la Résistance	0% de Laitier	10% de Laitier	15% de Laitier	20% de Laitier	25% de Laitier
7	Compression	48.32	43.11	41.80	40.13	35.62
	Traction	7.72	6.83	5.90	5.09	4.53
28	Compression	68.52	63.48	60.93	52.18	48.72
	Traction	7.90	7.52	7.06	6.45	5.94
56	Compression	70.12	68.20	65.82	56.01	51.06
	Traction	/	/	/	/	/
90	Compression	71.31	69.21	67.39	59.23	53.68
	Traction	8.01	7.79	7.52	7.23	7.02

4.6.1 Résistance à la Compression

La figure 4.27 montre la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en laitier à différents âges. Une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange est observée à tous les âges. En effet, à 28 jours et en chiffres, cette diminution équivaut à 7,36%, 11%, 23,85% et 28,90% respectivement pour des taux de substitution du ciment par du laitier de 10%, 15%, 20% et 25%. Néanmoins on remarque que la diminution de la résistance à la compression est moins importante dans le cas des âges avancés (56 et 90 jours après malaxage), en comparant les résistances à la compression pour les deux teneurs en laitier, 0 et 15%, on remarque que la différence à 28 jours était de 7,69 MPa, pour diminuer à 4,30 à 56 jours et 3,92 à 90 jours, soit une diminution de 44% et 49% respectivement.

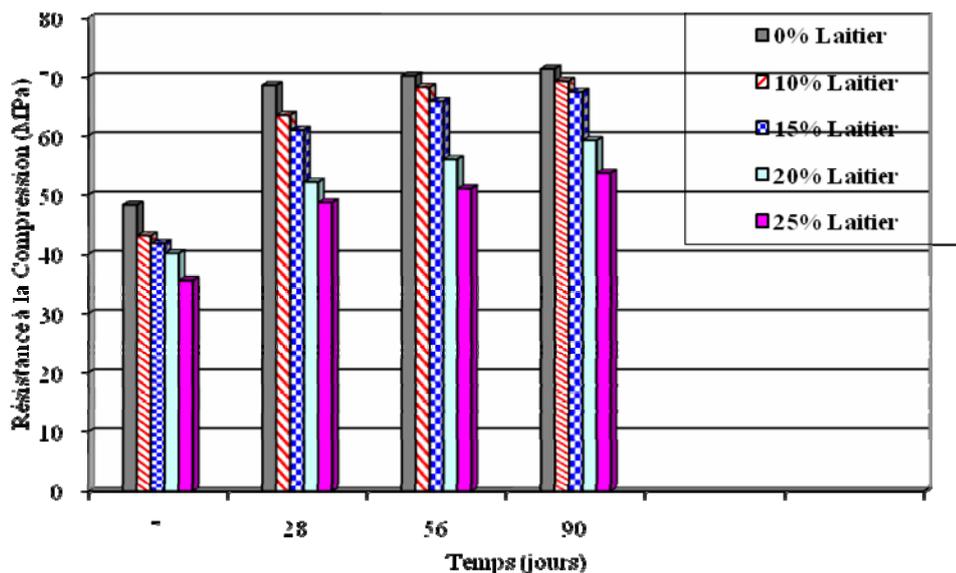


Figure 4.27 : Variation de la Résistance à la Compression en fonction du Temps

Amrane et Kenai [144] ont introduit le laitier, par substitution, jusqu'à 50%. Ils ont observé une diminution de la résistance jusqu'à 28 jours, pour tous les pourcentages de substitution, mais à 90 jours, et pour 15% de substitution du ciment par du laitier, ils ont enregistré une résistance nettement supérieure à celle du béton de référence.

Necira et al [174] ont utilisé les mêmes matériaux avec incorporation du laitier jusqu'à 50% avec un rapport E/L = 0,35 et un dosage en superplastifiant de 1,3%. Ils ont trouvé, pour

15% de laitier, une résistance à la compression à 28 jours égale à environ 48 MPa contre 61 MPa dans notre cas.

Bougara et al [148] ont expliqué les propriétés mécaniques faibles, à jeune âge, du béton à base de laitier par la lente réactivité du laitier. Ils ont aussi trouvé que la résistance à la compression à long terme augmente avec l'augmentation de la finesse du laitier. Néanmoins une augmentation de la finesse de 360 à 420 m²/kg n'augmentera pas significativement la résistance, il n'y a donc aucun intérêt à broyer le laitier au delà de 360 m²/kg. Enfin ils concluent qu'en augmentant la température de cure, la résistance à jeune âge augmente et la résistance à long terme diminue.

Khatib et Hibbert [190] ont observé un effet similaire du laitier sur le développement de la résistance à la compression sur quatre mélanges de BAP à différents teneurs en laitier 0%, 40%, 60% et 80%. Ils ont observé une diminution systématique de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en laitier durant les stades avancés d'hydratation. Au-delà de 28 jours et jusqu'au moins 90 jours, la présence du laitier a été hautement bénéfique à 40% et 60% de substitution dépassant même la résistance du béton de control. Une remarquable diminution de résistance, pour tous les âges, a été observée pour les mélanges des BAP contenant 80% de laitier.

Un effet similaire sur la résistance à la compression a été observé avec la pouzzolane naturelle sur le béton ordinaire [191].

Behim et al [149] ont trouvé des valeurs maximales de la résistance à la compression à 28 jours aux environs de 55 MPa entre 10 et 15% de teneur en laitier. Au delà de cette teneur, les résistances diminuent considérablement. Li et Ding [173] ont rapporté que l'incorporation du laitier à raison de 20 à 30% dans le mortier améliore nettement sa résistance à la compression. Babu et Kumar [192] ont retracé des courbes de Hwang et Lin [193] donnant la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en laitier et à différents âges. Ils ont conclu que la résistance à la compression dépend à la fois, de la teneur en laitier et de l'âge.

Borsoi et al [28] ont trouvé que la résistance à la compression du BAP avec du laitier ou bien avec du laitier-Cendres volantes est plus élevée que celle du BAP avec les cendres volantes uniquement, en particulier aux jeunes âges. Öner et Akyuz [194] ont rapporté que la résistance à la compression des mélanges de béton contenant du laitier augmente avec l'augmentation de la quantité de laitier. Au delà d'un optimum d'environ 55% de substitution

du ciment par du laitier, la résistance à la compression cesse d'augmenter en raison de la présence de laitier sans réaction qui agit uniquement comme un filler dans la pâte.

Chidiac et Panesar [195] ont introduit le laitier jusqu'à 60%. Pour un rapport E/L = 0,38, ils ont trouvé que la résistance à la compression du mélange, à 28 jours est à son maximum pour 20% de laitier et qu'au delà, la résistance rechute. Le gain de résistance à 120 jours par rapport à 28 jours est de 10%.

O'Rourke et al [196] ont trouvé qu'au delà de 28 jours les résistances à la compression des bétons contenant du laitier se rejoignent avec celles du béton de référence.

En dehors du souci économique, des études récentes suggèrent que certaines combinaisons d'ajouts améliorent davantage la résistance à la compression, l'ouvrabilité et le module d'élasticité du béton que lorsqu'ils sont utilisés séparément. Selon Samet et Chaabani [197], un béton à la fumée de silice atteint une résistance à la compression 15 % supérieure lorsqu'on lui substitue 15 % du laitier tunisien. Toutanji et al [198] ont obtenu, avec un mélange de 10% de fumée de silice, 25 % de laitier et 15 % de cendre volante, une meilleure résistance lorsque les éprouvettes sont exposés à un gel-dégel.

Toujours dans le cadre d'effet des ajouts combinés, Fang et al [164], ont pu améliorer la résistance à la compression à 28 jours à 69 MPa en substituant au ciment 30% de cendres volantes et 30% de laitier mais en prenant un rapport E/L égale à 0,28.

4.6.2 Résistance à la Traction

La figure 4.28 montre la variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur en laitier. Tout comme les résistances à la compression, les résistances à la traction diminuent avec l'augmentation de la teneur en laitier. De la même manière on évalue cette diminution à 28 jours et en chiffres, elle équivaut à 4,81%, 10,63%, 18,35% et 24,81% respectivement pour des taux de substitution du ciment par du laitier de 10%, 15%, 20% et 25%. La diminution est moins importante à 90 jours d'âge, en comparant les résistances à la traction pour les deux teneurs en laitier, 0 et 15%, on remarque que la différence à 28 jours était de 0,84 MPa, pour diminuer à 0,49 à 90 jours, soit une diminution de 42%. On ajoutera en fin qu'à 28 jours, la diminution de la résistance à la traction est moins importante que celle de la résistance à la compression et ce pour tous les taux de substitution du ciment par du laitier.

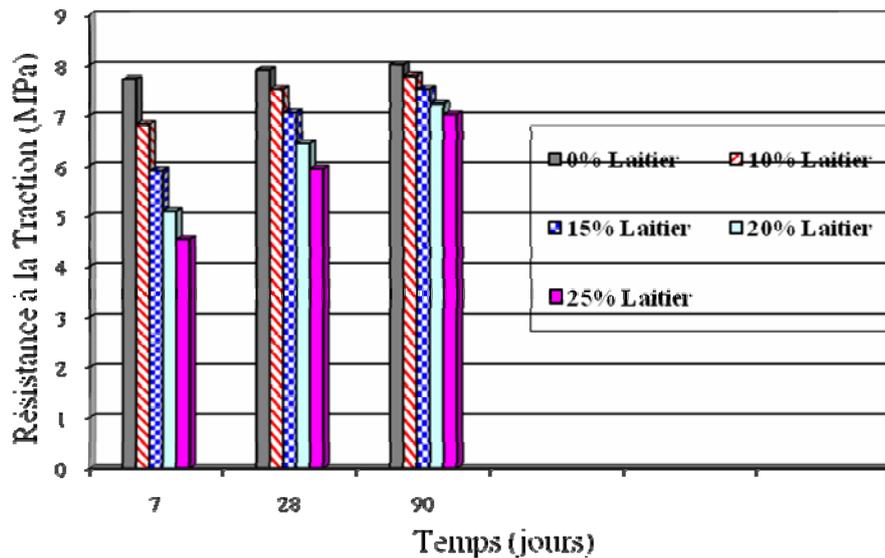


Figure 4.28 : Variation de la Résistance à la Traction en fonction du Temps

Felekoglu et al [101] ont montré que les mélanges de BAP présentent des résistances à la traction élevées comparées à celles des bétons traditionnels. Selon Klug et Holschemacher [95], la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés et peut aller jusqu'à 40% ce qui implique qu'il y a nécessité de revoir la section minimale de ferrailage. Behim et al [149] ont rapporté, à peu près, les mêmes conclusions que celles des résistances à la compression. Les valeurs maximales de la résistance à la traction à 28 jours avoisinent les 9 MPa entre 10 et 15% de teneur en laitier. Au delà de cette teneur, les résistances diminuent considérablement. Ils ont conclu ensuite que la finesse du laitier agit favorablement sur les résistances mécaniques. D'après Domone [40] le rapport entre les résistances à la traction et à la compression pour le BAP est très similaire à celui des bétons ordinaires.

4.7 Conclusion

Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que la méthode OKAMURA peut être modifiée pour formuler un BAP à base de matériaux locaux. 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.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Généralités

Le béton autoplaçant offre plusieurs avantages techniques, économiques et environnementaux. Cependant, sa formulation à base de matériaux locaux nécessite une étude particulière et précise, afin de bien pouvoir la concrétiser. Le choix de la méthode n'était pas évidente et dépendait de la disponibilité ou non des matériaux adéquats surtout en termes de superplastifiants et agents de viscosité. La méthode OKAMURA semblait être la mieux appropriée pour la simple raison qu'elle est la méthode de base et ne nécessitait pas la présence d'un agent de viscosité.

L'objectif de ce travail de thèse était donc d'étudier l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant, à travers la valorisation du laitier du complexe sidérurgique d'El-Hadjar. Ainsi le laitier a été introduit aux mélanges de béton par substitution au ciment à différents pourcentages. Deux types de superplastifiants, appartenant à deux générations différentes, ont été utilisés.

Conclusions Générales

L'étude menée a permis en premier lieu de conclure que la méthode OKAMURA appelée aussi « Méthode Générale » pouvait être utilisée avec les matériaux locaux avec quelques modifications concernant surtout l'optimisation de la teneur en sable et en superplastifiant ainsi que la teneur en eau. Il s'agissait, au début de fixer tous les paramètres afin de pouvoir étudier l'effet du laitier sur les propriétés des BAP aux deux états frais et durci.

Des différents essais effectués, les conclusions suivantes peuvent être dressées:

1. Le béton autoplaçant peut être confectionné en utilisant les matériaux locaux.
2. En utilisant le superplastifiant PC, le pourcentage optimal Sp/L à utiliser dans les mélanges de béton est de 1.6%.
3. En utilisant le superplastifiant PNS, le pourcentage optimal Sp/L à utiliser dans les mélanges de béton est de 1.8%.
4. Les mélanges de mortier avec le superplastifiant PC accusent une meilleure ouvrabilité que ceux avec le superplastifiant PNS. Ceci était prédictible du moment que le superplastifiant à base de polycarboxylate (PC) représente la nouvelle génération des superplastifiants.
5. Du point de vue ouvrabilité et rhéologie, une teneur en laitier à 20% peut donner un bon béton autoplaçant sans ressuage ni ségrégation, avec un optimum de 15%.
6. Le laitier a le même effet sur les mélanges de BAP quelque soit la nature du superplastifiant utilisé.
7. À 15% de teneur en laitier, l'ouvrabilité peut être retenue jusqu'à 60 minutes en utilisant le superplastifiant PC à base de polycarboxylate.
8. Le superplastifiant PC à base de polycarboxylate est plus efficace, du point de vue ouvrabilité et rhéologie, que le superplastifiant PNS à base de Polynaphtalène Sulfonate.
9. A partir de l'essai au cône d'Abrams modifié on peut évaluer les paramètres rhéologiques, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.
10. Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique sont inversement proportionnels à l'étalement des BAP, quand l'étalement augmente les propriétés rhéologiques des BAP diminuent et inversement.
11. La viscosité plastique est proportionnelle aux temps d'écoulement T_{500} au cône d'Abrams et T_v de l'entonnoir en V (V-Funnel).
12. Les résistances mécaniques diminuent en présence du laitier toutefois, elles ne sont pas significatives d'autant plus qu'elles sont rattrapées à long terme, au-delà de 28 jours.

Recommandations :

Les travaux dans le cadre de cette Thèse ont été limités à l'étude de l'effet du laitier sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP et d'autres aspects restent à élucider. Par conséquent, nous recommandons, pour de futurs travaux, ce qui suit :

1. Fabriquer des BAP avec d'autres ajouts minéraux tels que la pouzzolane naturelle, les fines calcaires ou un mélange d'ajouts.
2. 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.
3. Réaliser des essais de durabilité (perméabilité aux gaz, eau et aux ions chlore) à long terme.
4. Etudier d'autres aspects à caractère structural tels que :
 - a. La pression latérale des BAP exercée sur le coffrage
 - b. La corrosion des aciers dans des éléments construits en BAP
 - c. Les déformations des structures en BAP sous l'effet du séisme
 - d. Le comportement du BAP en dessous des eaux de mer
5. Les BAP étant très fluides, il serait intéressant de mener des études sur leur pompabilité.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- [1] Baron J. et Ollivier J.P., "Les bétons – Bases et données pour leur formulation" Editions Eyrolles, 1996, 243 p.
- [2] Okamura H. and Ouchi M. « Self-compacting concrete » Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp. 5-15.
- [3] Okamura H. and Ouchi M., "Self-Compacting Concrete. Development, present use and future", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 1999, Stockholm, Suède pp. 3-14.
- [4] Walraven « Structural aspect of self-compacting concrete » proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 15-22.
- [5] Association française de Génie Civil (AFGC) « Bétons Auto-Plaçants Recommandations provisoires » juillet 2002, 63 pages.
- [6] Billberg P. « Form Pressure generated by self-compacting concrete » Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 271-280.
- [7] Leehmann and Hoffman « Pressure of self-compacting concrete on the formwork » Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 288-295.
- [8] Assaad J.J. and Khayat K.H. « Effect of casting rate and concrete temperature on formwork pressure of self-consolidating concrete » Materials and Structures (2006) vol 39, pp. 333–341.
- [9] Ovarlez and Roussel « A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork » Materials and Structures (2006) vol 39, pp. 269–279.
- [10] Fédération française du béton (FFB) « Recommandations de mise en œuvre des BAP et des BAN » SEBTP, édition 2003
- [11] Matabee K. Maeda, Yamada K. and Uchida A. "Evaluation on the practicability of

- SCC” Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, 1999, Sweden, pp. 617-628.
- [12] Assaad J. and Khayat K.H. « Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Lateral Pressure Exerted by Self-Consolidating Concrete » *ACI Materials Journal*, May-June 2005, pp. 145-153.
- [13] Projet National BAP « Aide à la rédaction de cahier des charges techniques pour le Bétons Auto-Plaçants (BAP) » Mars 2005.
- [14] Andriamanantsilavo N.R., Amziane S. et Baudeau P. « Étude expérimentale sur l'évolution de la pression exercée par une pâte de ciment contre un coffrage pendant la prise » *Rhéologie*, 2003, vol. 3, pp. 12-21.
- [15] Turcry P. « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation » Thèse de doctorat de l'École centrale de Nantes, 2004, 213 pages.
- [16] RILEM Technical Committee « Final report of RILEM TC 188-CSC 'Casting of self-compacting concrete» *Materials and Structures*, 2006, vol 39, pp. 937–954.
- [17] Holcim « Le béton autocompactant Recommandation » Suisse, SA, Version 26.11.2004
- [18] Jarny S. « Thixotropie des pâtes cimentaires » Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Décembre 2004, 233 pages.
- [19] EL BARRAK M. « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais » Thèse de Doctorat de l'université toulouse III – Paul Sabatier, Juillet 2005, 228 pages.
- [20] Lange F., Mörte H. and Rudert V. "Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties" *Cement and Concrete Research*, 1997, vol 27, pp. 1481-1488.
- [21] Kadri E.H. and Duval R. "Effect of silica fume on the heat of hydration of high-performance concrete" *The Seventh CANMET/ACI International conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete*, 2001, Madras, India, pp. 22-27.
- [22] Brooks J.J., Johari M.A.M. and Mazloom M. « Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete » *Cement & Concrete Composites*, 2000, vol 22, pp. 293-301.
- [23] Yahia A., Tanimura M. and Shimoyama Y. "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler of powder content and W/C ratio, Cement

- and concrete research, 2005, vol 35, pp. 532-539.
- [24] Cyr M. and Mouret M. "Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures: Consequences on self-Compacting Concrete design", Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Allemagne, 2003, pp. 241-255.
- [25] Collins F. and Sanjayan J.G. « Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na₂CO₃ » Cement and Concrete Research, 1998, Vol. 28, No. 5, pp. 655–664.
- [26] Nehdi M., Pardhan M. and Koshowski S. « Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements » Cement and Concrete Research, 2004, vol 34, pp. 2103–2112.
- [27] Sharp J.H., Hill J., Milestone N.B. and Miller E.W. « Cementitious systems for encapsulation of intermediate level waste » Proceedings of ICEM '03: The 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, September 21 – 25, 2003, Examination School, Oxford, England, pp. 1-10.
- [28] Borsoi A., Collepari M., Collepari S., Troli R. and Zanardi L. « Low-Heat, High-Strength, Durable Self-Consolidating Concretes » 9th CANMET/ACI International Conference on recent Advances in Concrete Technology, Warsaw, Poland, 2007, pp. 399-409.
- [29] Al-Otaibi S. « Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass » Construction and Building Materials, 2008, vol 22, pp. 2059–2067.
- [30] Hu C., "Rhéologie des bétons fluides", Rapport issu de la thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, LCPC, 1995
- [31] Sedran T., "Les bétons autonivelants - Synthèse bibliographique", Bulletin liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, mars-av 1995, pp. 53-60.
- [32] Abib Z., "formulations et caractérisation des bétons autoplaçants" Mémoire de Magister, Juillet 2004, U.S.T.H.B., 114 pages.
- [33] Bethmont S. « Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) Etude expérimentale des interactions granulaires » Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Décembre 2005.
- [34] Jin J. « Properties of mortar for self-compacting concrete » PhD thesis, University College London, 2002, 398 pages

-
- [35] Domone, P.L., Chai, H.W. and Jin, J. “Optimum mix proportioning of self-compacting concrete” Proceeding on international conference on ‘innovation in concrete structures: design and construction’, University of Dundee, ed Dhir RK and Jones MR, Thomas Telford, London, 1999, pp. 277-285.
- [36] König G., Dehn F., Weise F. and Hertel C. “Applications of ready-made binders for self-compacting concrete (SCC)” Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete , Japan, 2001, pp. 361-367.
- [37] El-Ariss B. « Effect of reducing coarse aggregates on concrete strength » Construction and Building Materials, 2006, vol 20, pp. 149–157.
- [38] Felekoglu B. « A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete » Construction and Building Materials, 2008, vol 22, pp. 646–654.
- [39] Menadi B., Kenai S., Khatib J. and Aït-Mokhtar A. « Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand » Construction and Building Materials, 2009, vol 23, pp. 625–633.
- [40] Domone P.L. « A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, Cement & Concrete Composites, 2007, vol 29, pp. 1–12.
- [41] Shobha M., Mohan D.H. and Raju P.S.N. « Aggregate size and behavior of SCC » Proceedings of the Institution of Civil Engineers Construction Materials 159 November 2006, Issue CM4, pp. 147–152.
- [42] Wu Z., Zhang Y., Zheng J. and Ding Y. « An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete » Construction and Building Materials, 2009, vol 23, pp. 2087–2092.
- [43] Bassuoni M.T. and Nehdi M.L. « Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading » Cement and Concrete Research, 2009, vol 39, pp. 206–226.
- [44] NF EN 1008 « Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement : P18-211) », Juillet 2003.
- [45] Flatt R.J. « Polymeric dispersants in concrete. In Polymers in particulate systems - Properties and applications » Marcel Dekker, Inc., 2002, 249 pages.
- [46] Uchikawa H., Hanehara S., and Sawaki D. « The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture »

-
- Cement and Concrete Research, 1997, vol 27, pp. 37–50.
- [47] Neubauer C.M., Yang M. and Jennings H.M. «Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions - effects of admixtures » *Advanced Cement Based Materials*, 1998, vol 8, pp. 17–27.
- [48] Flatt R.J., Houst Y.F., Bowen P., Hofmann H., Widmer J., Sulser U., Maeder U. and Bürge T.A. « Interaction of superplasticizers with model powders in a highly alkaline medium » In *Fifth CANMET/ACI International Conference*, 1997
- [49] Björnström J. and Chandra S. « Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements » *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, December 2003, Vol 36, pp. 685-692.
- [50] Zemirline S., "Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton fluide (autoplaçant)" *Mémoire de Magister*, Juin 2008, Centre Universitaire de Médéa, 140 pages.
- [51] Domone P.L.J. and Jin J. "Properties of mortar for Self-Compacting Concrete" *Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, RILEM Proceedings PRO 7, 1999, Paris, pp. 109–120.
- [52] Yamada K., Ogawa S. and Takahashi T. "Improvement of the compatibility between cement and superplasticizer by optimizing the chemical structure of the polycarboxylate-type superplasticizer" *Proceedings of the second International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete*, Japan, 2001, pp.159-168.
- [53] Agarwal S.K., Masood I. and Malhotra S.K. « Compatibility of superplasticizers with different cements » *Construction and Building Materials*, 2000, vol 14, pp. 253-259.
- [54] Aïtcin P.C., Jiang S., KIM B.G., Nkinamubanzi P.C. and Pérov N. « L'interaction ciment/superplastifiant : Cas des polysulfonates » *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées - 233- Juillet-Août 2001*, pp. 87-98.
- [55] Khayat K.H. and Ghezal A. "Effect of viscosity-modifying admixture superplasticizer combination on flow properties of SCC Equivalent Mortar" *Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Islande, 2003, pp. 369-385.
- [56] Rols S., Ambroise J. and Péra J. "Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete" *Cement and Concrete Research*, 1999, vol 29, pp. 261-266.
- [57] Lachemi M., Hossain K.M.A., Lambros V., Nkinamubanzi P.C. and Bouzoubaâ N. "Self-consolidating concrete incorporating new viscosity modifying admixtures »

- Cement and Concrete Research, 2004, vol 34, pp. 917-926.
- [58] Petersson Ö. and Billberg P. "Investigation on blocking of Self-Compacting Concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler" Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete 1999 in Sweden, pp. 333-344.
- [59] Gibb I. "Single-Shot: Admixture for Self-Compacting Concrete" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland, pp. 415-419.
- [60] Efnarc « The European guidelines for self compacting concrete » The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. www.efnarc.org, 2005, 68p
- [61] Petersson Ö, Gibbs J. and Bartos P. "Testing-SCC: A European Project" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, 2003, Reykjavik, Iceland, pp. 299-304.
- [62] Sonebi M. and Bartos P.J.M. « Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete » Materials and Structures, 2002, Vol 35, pp. 462-469.
- [63] Efnarc « Specification and guidelines for SCC » Février 2002, available on www.efnarc.org
- [64] Jin J. and Domone P.L. "Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component" Proceedings of the first North American Conference on the design and use of Self-Consolidating Concrete, Centre for Advanced Cement Based Materials, North Western University, Chicago, November 2002, pp. 33-38.
- [65] Chapdelaine F. « Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais » Mémoire de Master (M.Sc.), 1998 Université de Laval, 126 pages.
- [66] Couarraze, G. et Grossiord, J.L. « Initiation à la rhéologie » Lavoisier, Paris, 1983, 219 pages.
- [67] Skarp U., Engstrand J., Jansson I., Bigley C.H., Omari M. and Wirje A. "A new concept for improved rheological stability to allow reduction in cement content of self compacting concrete" Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete, Japan in 2001, pp. 369-375.
- [68] Shi and al., « A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste », Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, vol 20, pp. 9-14.
- [69] Wallevik J.E. "Relationship between the Bingham parameters and slump" Cement

- and Concrete Research, 2006, vol 36, pp. 1214–1221.
- [70] Beaupré D. and Mindess S. « Rheology of Fresh Concrete : Principles, Measurement, and Applications » Material Science of Concrete V edited by JSKALNY, S.MINDESS, 1998, pp. 149-190.
- [71] Hwang S.D. and Khayat K.H. « Effect of mix design on restrained shrinkage of self-consolidating concrete » Materials and Structures, Published on line 27 March 2009
- [72] BANFILL P.F.G. « Workability of Flowing Concrete » Magazine of Concrete Research, 1980, Vol.32, No. 110, March, pp.12-27.
- [73] RILEM "Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC", Edited by A. Skarendahl and O. Petersso, RILEM Publications, France, 2001.
- [74] Turcry P. et Loukili A. "Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants : incidence sur les caractéristiques rhéologiques" Forum des associations AFGC/AUGC/IREX : innovation et développement en génie civil et urbain - nouveaux bétons, Toulouse, 30-31 mai 2002.
- [75] Edamatsu Y., Nishida N. and Ouchi M. "A rational mix-design method for selfcompacting concrete considering interaction between coarse and mortar particles", Proceedings of the First International RILEM Symposium on SelfCompacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp. 309-320.
- [76] Petersson O., Billberg P. and Van B.K. "A model for self-compacting concrete" Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete, Paisley, Ecosse, 1996.
- [77] Billberg P. "Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience", Report 2:99, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 80 p., 1999.
- [78] Ozawa K., Tangtermsirikul S. and Maekawa K. "Role of powder materials on filling capacity of fresh concrete", Proceedings of the 4th CANMET/ACI Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 1992, Istanbul, Turquie, pp. 121-137.
- [79] Van B.K. "A method for the optimum proportioning of the aggregate phase of highly durable vibration-free concrete", MSc thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1994.
- [80] Tangtermsirikul S. and Van B.K. "Blocking criteria for aggregates phase of Selfcompacting high performance concrete", Proceedings of Regional Symposium

- on Infrastructures Development in Civil Engineering, Bangkok, pp. 58-69, 1995.
- [81] Hasni L., "Bétons autoplaçants - Synthèse bibliographique", rapport de recherche CEBTP, juillet 1999, 46 pages.
- [82] Bui V.K., Montgomery D., Hinczak I. and Turner K. "Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, 2002, vol 32, pp.1489-1496.
- [83] Bui V.K., Akkaya Y. and Shah S.P. "Rheological Model for self-consolidating concrete", *ACI Materials Journal*, Novembre-Décembre 2002, vol 99, pp.549-559.
- [84] Sedran T. and De Larrard F. "Optimization of self compacting concrete thanks to packing model", *Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Suède, 1999, pp.321-332.
- [85] De Larrard F. "Structures granulaires et formulations des bétons", *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, Paris, avril 2000.
- [86] De Larrard F. and Sedran T. "Mixture-proportioning of high-performance concrete", *Cement and Concrete Research*, 2002, vol 32, pp.1699-1704.
- [87] Khayat K.H., Ghezal A. and Hadriche M.S. "Utility of statistical models in proportionning self-consolidating concrete", *Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Suède, 1999, pp. 345-359.
- [88] Nielsson I. and Wallewick O.H. "Rheological evaluation of some empirical test methods – preliminary results", *Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Islande, 2003, pp.59-68.
- [89] Persson B. "Creep, Shrinkage and Elastic Modulus of Self-Compacting Concrete" *Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete 1999 in Sweden*, pp. 239-250.
- [90] De Larrard F. "Concrete mixture-proportioning - A scientific approach", *Modern Concrete Technology Series*, N°9, E&FN SPON, 1999.
- [91] Gibbs J.C. and Zhu W. "Strength of hardened self-compacting concrete" *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Suède, 1999, pp.199-209.
- [92] Sonebi M. and Bartos P.J.M. "Hardened SCC and its bond with reinforcement" *Proceeding of First International RILEM Symposium on SelfCompacting Concrete*, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 275-289.

-
- [93] Petersson Ö. “Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength” Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, 2001, pp.277-284.
- [94] Felekoglu B., Yardimci M. Y. and Baradan B. “A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete”, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp.446-456.
- [95] Klug Y. and Holschemacher K. “Comparison of the hardened properties of Self Compacting and Normal Vibrated Concrete” 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, 2003, pp. 596-605.
- [96] Guneyisi E. and Gesoglu M. « A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag » Materials and Structures, 2008, vol 41, pp. 479–493.
- [97] Choi Y.W., Kim Y.J., Shin H.C. and Moon H.Y. « An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete » Cement and Concrete Research, 2006, vol 36, pp. 1595–1602.
- [98] Assié S., Escadeillas G., Marchese G. and Waller V. « Durability properties of low-resistance self-compacting concrete » Magazine of Concrete Research, 2006, vol 58, pp. 1–7.
- [99] Nassif H.H., Najm H. and Suksawang N. « Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC » Cement & Concrete Composites, 2005, vol 27, pp. 661–670.
- [100] Persson B. « A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete » Cement and Concrete Research, 2001, vol 31, p. 193-198.
- [101] Felekoglu B., Turkel S. and Baradan B. « Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete » Building and Environment, 2007, vol 42, pp. 1795–1802.
- [102] Gram H.E. and Piiparinen P. “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, 1999, pp. 211-225.
- [103] Song H.W., Byun K.J., Kim S.H. and Choi D.H. “Early-Age creep and shrinkage in Self-Compacting Concrete incorporating GGBFS” Proceedings of the second International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, 2001, pp. 413-422.
- [104] Vitek J.L. “Long-Term Deformations of Self-Compacting Concrete” 3rd

- International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, 2003, pp. 663-671.
- [105] Hu C. et Barbieri B., « Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel », Science des matériaux et propriétés des bétons, 1ère Rencontre Internationale, Toulouse, 1998, pp. 265-272.
- [106] Vieira M. and Bettencourt A. "Deformability of hardened SCC" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, 2003, pp. 637-644.
- [107] Pons G., Proust E. and Assié S. "Creep and Shrinkage of Self-Compacting Concrete : A different behavior compared with vibrated concrete ?" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, 2003, pp. 645-654.
- [108] Lee K.M., Lee H.K., Lee S.H. and Kim G.Y. « Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag » Cement and Concrete Research, 2006, vol 36, pp. 1279–1285.
- [109] Neville A. M., " Propriétés des Bétons ", traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.
- [110] Van B. K. and Montgomery D. "Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone" Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 227-238.
- [111] Proust E. « Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés », thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002.
- [112] Mortsell E. and Rodum E. "Mechanical and durability aspects of SCC for road structures" Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, 2001, pp. 459-468.
- [113] Jianyong L. et Yan Y. « A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete » Cement and Concrete Research, 2001, vol 31, pp. 1203–1206.
- [114] Chan Y.W., Chen Y.G. et Liu Y.S. "Effect of consolidation on bond of reinforcement in Concrete of different workabilities" ACI Materials Journal, July-August 2003, vol 100, pp. 294-301.
- [115] Valcuende M. et Parra C. « Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes » Construction and Building Materials, 2009, vol 23, pp. 162–170.
- [116] RILEM Technical Committee « Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of

- self-compacting concrete » *Materials and Structures*, 2008, vol 41, pp. 225–233.
- [117] Persson B. « Fire resistance of self-compacting concrete, SCC » *Materials and Structures*, November 2004, Vol 37, pp. 575-584.
- [118] Cheng A., Huang R., Wu J.K. et Chen C.H. “Influence of GGBS on durability and corrosion behaviour of reinforced concrete” *Materials Chemistry and Physics*, 2005, vol 93, pp. 404-411.
- [119] Pal S.C., Mukherjee A. and Pathak S.R. “Corrosion behaviour of reinforcement in slag concrete” *ACI Materials Journal*, November-December 2002, vol 99, pp. 521-527.
- [120] Yeau K.Y. et Kim E.K. « An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag » *Cement and Concrete Research*, 2005, vol 35, pp. 1391–1399.
- [121] Hou W.M., Chang P.K., and Hwang C.L. « A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag » *Cement and Concrete Research*, 2004, vol 34, pp. 615–622.
- [122] Hassan A.A.A., Hossain K.M.A. and Lachemi M. « Corrosion resistance of self-consolidating concrete in full-scale reinforced beams » *Cement & Concrete Composites*, 2009, vol 31, pp. 29–38.
- [123] Zhu W., Quinn J., Bartos P.J.M., “ Transport properties and durability of self-compacting concrete ”, *Proceedings of 2nd International Symposium on SelfCompacting Concrete*, Tokyo, Japon, 2001, pp. 451-458.
- [124] De Schutter G. and Audenaert K. « Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration » *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, Vol. 37, November 2004, pp. 591-596.
- [125] Dinakar P., Babu K.G. and Santhanam M. « Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes » *Cement & Concrete Composites*, 2008, vol 30, pp. 880–886.
- [126] Perraton D., Aitcin P.C. et Carles-Gibergues A., « Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque », *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1999, vol 221, pp. 69-78.
- [127] Trägårdh J. “Microstructural features and related properties of selfcompacting concrete”, *Proceedings of First International RILEM Symposium on SelfCompacting Concrete*, Stockholm, Suède, 1999, pp.175-186.
- [128] De Schutter G., Audenaert K., Boel V., Vandewalle L. et al, “Transport properties

- in self-compacting concrete and relation with durability: overview of a Belgian research project” Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp.799-807.
- [129] Assié S. « Durabilité des bétons autoplaçants » Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Octobre 2004, 249 pages
- [130] Tang L., Andalen A., Johansson J.O. and Hjelm S. “ Chloride diffusivity of self-compacting concrete ”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp.187-198.
- [131] Rougeau P., Maillard J.L. and Mary-Dippe C., “Comparative study on properties of self-compacting concrete and high performance concrete used in precast construction”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp. 251-261.
- [132] Attiogbe E.K., See H.T. and Daczko J.A. “Engineering properties of self-consolidating concrete”, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, Novembre 2002, pp. 371-376.
- [133] Audenaert K., De Schutter G., “Chloride penetration in selfcompacting concrete”, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on SelfCompacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 818-825.
- [134] Trägårdh J., Skoglund P. and Westerholm M., “Frost resistance, chloride transport and related microstructure of field self-compacting concrete”, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 881-891.
- [135] Güneysi E., Gesoglu M., Özturan T. and Özbay E. « Estimation of chloride permeability of concretes by empirical modeling: Considering effects of cement type, curing condition and age » Construction and Building Materials, 2009, vol 23, pp. 469–481.
- [136] Ramachandran V.S., Malhorta V.M., Jolicoeur C. et Spiratos N. « Superplasticizers : Properties and applications in concrete » Materials Technology Laboratory, CANMET, Canada 1998
- [137] Dreux G. et Festa J. « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Edition Eyrolles, 1998
- [138] Khayat K.H. and Assaad J. “Air-void stability in Self-Consolidating Concrete” ACI Materials Journal, 2002, V99, N°4, pp. 408-416.
- [139] Persson B. “Internal frost resistance and salt frost scaling of Self-Compacting

- Concrete” *Cement and Concrete Research*, 2003, vol 33, pp. 373-379.
- [140] Hans-Erik G. and Pentti P. “Properties of SCC- especially early age and long term shrinkage and salt frost” *Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete 1999 in Sweden*, pp. 211-225.
- [141] Lang E. and Geiseler J.F. « Use of Blastfurnace Slag Cement with high slag content for high-Performance Concrete » *Radical Concrete Technology*, Edited by R.K.Dhir and P.C.Hewlet, Published in 1996 by E & FN Spon, London, pp. 67-76.
- [142] Mechaymech A. « Optimisation et performance de bétons autoplaçants économiques à base de différentes combinaisons d’adjuvants et de liants composés » *Mémoire de Maîtrise ès sciences appliquées*, 2005, 183 pages.
- [143] Öner M., Erdoğan K. and Günlü A. “Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement” *Cement and Concrete Research*, 2003, vol 33, pp. 463-469.
- [144] Amrane A. et Kenai S. « Propriétés mécaniques et durabilité du béton au laitier en climat chaud » *Proceedings du séminaire international sur la qualité du béton en climat chaud*, Ghardaia, 1994, pp. 106-122.
- [145] Kateb M.L., "formulations des Bétons Autoplaçants à base de Laitier" *Mémoire de Magister*, Juillet 2006, U.S.T.H.B., 139 pages.
- [146] Boukendakdji M. "Mechanical Properties and Long-Term Deformation of Slag Cement Concrete" *PhD Thesis*, Department of Civil Engineering, The University of Leeds, UK, 1989.
- [147] Wainwright P.J. and Rey N. “The influence of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete” *Cement & Concrete Composites*, 2000, vol 22, pp. 253-257.
- [148] Bougara A., Lynsdale C. and Ezziane K. “Activation of Algerian slag in mortars” *Construction and Building Materials*, 2007, vol 23, pp. 542–547.
- [149] Behim M., Clastres P., Habita M.F. et Carles-Gibergues A. "Etude d'un nouveau ciment à base de Laitier granulé d'El-Hadjar (Algérie)" *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, Avril 2004, pp. 21-29.
- [150] Bouhamou N., Belas N., Mebrouki A., Mesbah H. et Ammar Y. « Etude de l’influence des paramètres de composition sur le comportement à l’état frais du béton autoplaçant à base de matériaux locaux » *Sciences Technologies et Développement*, ANDRU, 2007, N°2, pp. 31-49.
- [151] Aiad I., Abd El-Aleem S. and El-Didamony H. « Effect of delaying addition of

- some concrete admixtures on the rheological properties of cement pastes » *Cement and Concrete Research*, 2002, vol 32, pp. 1839–1843.
- [152] Takada K., Pelova G.I., and Walraven J.C. “Influence of Mixing Efficiency on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete” *Proceeding of International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Kochi, March 1999.
- [153] Takada K., and Walraven J.C. “Influence of mixing efficiency on the properties of flowable cement pastes” *Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete*, Japan in 2001, pp. 545-554.
- [154] De Larrard F., Cazacliu B., Chopin D., and Château E. “Production of SCC” *3rd International Symposium on Self Compacting Concrete*, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 481-494.
- [155] Nawa T., Izumi T., and Edamatsu Y. «State- of- the-art- report on materials and design of self compacting concrete» *Proc of Int. Workshop on Self-compacting Concrete*, ed K. Ozawa and K. Ouchi, Kochi University of Technology, Japan, August 1998, pp. 166-190.
- [156] Chai H. « Design and testing of SCC» *Ph.D thesis*, University College of London (UCL), April 1998, 259 pages.
- [157] De Schutter G. « Guidelines for testing fresh self-compacting concrete » *European Research Project: Measurement of properties of fresh self-compacting concrete*, Growth Contract No. GRD2-2000-30024, September 2005, 23 p, Available in www2.cege.ucl.ac.uk/research/oncrete/Testing-SCC.
- [158] Cussigh, Sonebi et De Schutter, *Project testing SCC-segregation test method*, *Proceedings of the third international RILEM conference on SCC*, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 311-322.
- [159] De Larrard F. et Ferraris C.F., «Rhéologie du béton frais remanié. III : L’essai au cône d’Abrams modifié», *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées (France)*, No. 215, Mai-Juin 1998, pp. 53-60.
- [160] Ferraris C.F., de Larrard F., « Testing and Modelling of Fresh Concrete Rheology », *NISTIR 6094*, National Institute of Standards and Technology, 1998, 61 pages.
- [161] Ferraris C.F., « Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report », *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1999, vol 104, n°5, pp. 461-478.
- [162] Roussel N. “Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results” *Materials and Structures*,

- 2006, vol 39, pp. 501–509.
- [163] Westerholm M., Lagerblad B., Silfwerbrand J. and Forsberg E. « Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars » *Cement & Concrete Composites*, 2008, vol 30, pp. 274–282.
- [164] Fang W., Jianxiong C. and Changhui Y. “Studies on Self-Compacting High Performance Concrete with high volume mineral additives” *Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete 1999 in Sweden*, pp. 569-578.
- [165] Spengler A. and Schiessl P. “Sand-rich Self Compacting Concrete” *Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete, Japan, 2001*, pp. 387-392.
- [166] Flatt R.J. and Houst Y.F. « A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers » *Cement and Concrete Research*, 2001, vol 31, pp. 1169–1176.
- [167] Sugamata T., Edamatsu Y. and Ouchi M. “Distinction between particle-dispersion and particle-repulsion effects of superplasticizers on the viscosity of fresh mortar” *Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete, Japan, 2001*, pp. 213-220.
- [168] Paine K.A., Dhir OBE R.K. and Zheng L. « Predicting early-age temperatures of blended-cement concrete » *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Construction Materials 159 November 2006 Issue CM4*, pp. 163–170.
- [169] Kadri E.H. and Duval R. « Effect of ultrafine particules on Heat of Hydration of Cement Mortars » *ACI Materials Journal*, March-April 2002, pp. 138-142.
- [170] Gruskovnjak A., Lothenbach B., Winnefeld F., Figi R., Ko S.C., Adler M. and Mäder U. “Hydration mechanisms of super sulphated slag cement” *Cement and Concrete Research*, 2008, vol 38, pp. 983–992.
- [171] Boukendakdji O., Kenai S., Kadri E.H. and Rouis F. « Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete » *Construction and Building Materials*, 2009, vol 23, pp. 2593-2598.
- [172] Aarre T. and Domone P. “Reference concretes for evaluation of test methods for SCC” *Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland. 2003*, pp. 495-505.
- [173] Li Z. and Ding Z. “Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag” *Cement and Concrete Research*, 2003, vol 33, pp. 579-584.

-
- [174] Necira B., Guettala A. et Chabi S. "Formulation des bétons autoplaçants: Effet des ajouts minéraux et des adjuvants" Sciences Technologies et Développement – ANDRU, 2007, N°2, pp. 66-79.
- [175] Shi Y.X., Matsui I. and Guo Y.J. "A study on the effect of fine mineral powders with distinct vitreous contents on the fluidity and rheological properties of concrete" Cement and Concrete Research, 2004, vol 34, pp. 1381–1387.
- [176] Sonebi M., Grünewald S. and Walraven J. « Filling ability and passing ability of Self-Compacting Concrete » ACI Materials Journal, March/April 2007, pp. 162-170.
- [177] Nguyen T.L.H., Roussel N. and Coussot P. « Correlation between L-box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid » Cement and Concrete Research, 2006, vol 36, pp. 1789–1796.
- [178] Daczko J.A. "A comparison of passing ability test methods for Self-Consolidating Concrete" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland, pp. 335-344.
- [179] European Union Growth Contract No. G6RD-CT-2001-00580 "Measurement of properties of fresh self-compacting concrete" Final Report – Project coordinator: ACM Centre, University of Paisley, UK. (2005).
- [180] Safawi M.I., Iwaki I. and Miura T. « A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete » Cement and Concrete Research, 2005, vol 35, pp. 1834–1845.
- [181] Rouis F., "Formulation et propriétés mécaniques d'un Béton autoplaçant à base de ciment pouzzolanique et (ou) de ciment de laitier" Mémoire de Magister, Décembre 2007, Centre Universitaire de Médéa, 136 pages.
- [182] Ohno A., Edamatsu Y., Sugamata T. and Ouchi M. "The mechanism of time dependence for fluidity of high belite cement mortar containing polycarboxylate-based superplasticizer" Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete, Japan, 2001, pp. 169-178.
- [183] Takada K. and Walraven J. "Evaluation for the effect of different types of superplasticizers considering the mixing effect" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, August 2003, Reykjavik, Iceland, pp. 403-414.
- [184] Park C.K., Noh M.H. and Park T.H. « Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures », Cement and concrete research, 2005, vol 35, pp. 842-849.
- [185] Sicker A., Huhn H.J., Mellwitz R. and Helm M., The Influence of Admixtures on

- the Rheological Properties of Mortars, LACER No. 2, 1997.
- [186] Gesoglu M. and Özbay E. « Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems » *Materials and Structures*, 2007, vol 40, pp. 923–937.
- [187] Bilgil A., Ozturk B. and Bilgil H. “A numerical approach to determine viscosity-dependent segregation in fresh concrete” *Applied Mathematics and Computation*, 2005, vol 162, pp. 225–241.
- [188] Reinhardt H.W. and Wüstholtz T. “About the influence of the content and composition of the aggregates on the rheological behaviour of self-compacting concrete” *Materials and Structures*, 2006, vol 39, pp. 683–693.
- [189] Sahmaran M., Yaman Ö and Tokyay M. “Development of high-volume low-lime and high-lime fly-ash-incorporated self-consolidating concrete” *Magazine of Concrete Research*, March 2007, vol 59, pp. 97–106.
- [190] Khatib J.M. and Hibbert J.J. “Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin” *Construction and Building Materials*, 2005, vol 19, pp. 460-472.
- [191] Ghrici M., Kenai S. and Meziane E. « Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana » *J. Mater Sci.*, 2006, vol 41, pp. 6965-6972.
- [192] Babu K.G. and Kumar V.S.R. “Efficiency of GGBS in Concrete” *Cement and Concrete Research*, 2000, vol 30, pp. 1031-1036.
- [193] Hwang C.L. and Lin C.Y. « Strength development of blended blast furnace slag cement mortars », *ACI SP 91, Detroit (1986)* pp. 1323-1340.
- [194] Öner A. and Akyuz S. « An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete » *Cement & Concrete Composites*, 2007, vol 29, pp. 505–514.
- [195] Chidiac S.E. and Panesar D.K. « Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28days » *Cement & Concrete Composites*, 2008, vol 30, pp. 63–71.
- [196] O’Rourke B., McNally C. and Richardson M.G. « Development of calcium sulfate–ggbS–Portland cement binders » *Construction and Building Materials*, 2009, vol 23, pp. 340–346.
- [197] Samet B. and Chaabani M. «Characterization of the Tunisien blast-furnance slag and its applications in the formulation of cement», *Cement and Concrete Research*,

2004, vol 35, pp. 1153-1159.

- [198] Toutanji H., Delatte N., Aggoun S., Duval R. and Danson A. « Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short term cured concrete » *Cement and concrete research*, 2004, vol 34, pp. 311-319.

ANNEXE A

BROYAGE DU LAITIER

ANNEXE A

BROYAGE DU LAITIER

A.1. Définition

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

A.2. Type de broyeur

a) broyeur à meules ou broyeur à galets

Du point de vue technique, ce broyeur entre dans la catégorie des broyeurs à force extérieurs c'est-à-dire que les éléments broyeurs sont pressés positivement sur le lit de matière. L'élément broyeur est constitué par des galets qui roulent librement dans cette auge rotative ou ils sont pressés sur la matière par l'intermédiaire d'un dispositif approprié. Les galets de broyeur, relativement grands, sont raccordés à un anneau stationnaire, de telle façon qu'il dévie vers le haut ou oscille radialement. La matière à broyer est introduite soit latéralement ou verticalement et tombe dans l'auge de mouture par le centre des anneaux. Ce type de broyeur est limité à l'utilisation du broyage de matière des caractéristiques d'humidité <20%, abrasivité 6%.

b) broyeur à boulets

Ces appareils ont pour rôle de transformer les matières grossières en poudres très fines. Les broyeurs à boulets sont nés de l'observation de l'action réciproque des galets au bord de la mer qui brassés par les vagues, réduisent en s'entrechoquant, les grains de sable en grains de plus en plus fins, en même temps que leurs usures leur donnent une forme plus au moins sphérique.

c) broyeur aérofall

Ce broyeur est constitué d'une vérole de grand diamètre et de faible longueur montée sur deux tourillons creux, le rapport diamètre/longueur (dimension interne) est de l'ordre de 2,5 à 4,2 suivant la taille du broyeur.

Cet appareil est équipé de deux sortes de blindages :

- ❖ Des rails de relevage garnissant la périphérie du broyeur
- ❖ Des blindages déflecteurs garnissant les cotés verticaux du broyeur

A.3. Type d'installation

Il existe deux types d'installation de broyage :

- ❖ Broyage à circuit ouvert
- ❖ Broyage à circuit fermé

a) Broyage en circuit ouvert :

Les premières installations étaient faites de deux broyeurs en cascades, le premier broyeur appelé préparateur ayant pour fonction de triturer la matière, et un deuxième broyeur appelé finisseur, ayant pour fonction de rendre la matière préparée la plus fine possible.

- **Avantages :** - procéder de broyage simple
 - chaque broyage pouvant : / avoir le diamètre optimal

/ tourner à la vitesse optimale pour l'action demandé aux corps bruyants

- **Inconvénients :** - installation coûteuse
 - débit faible
 - produit fini incontrôlable

b) Broyage en circuit fermé :

Dans ce type de circuit, l'atelier n'est plus limité à l'installation du broyeur, mais à une installation, plus complexe nécessitant l'adjonction d'autre appareils ; appareil de classification du produit fini (séparateur), Appareil de manutention du produit (élévateurs, vis, aéroglissière)

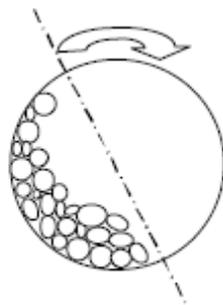
- **Avantages :**
 - Sélection plus soignée
 - Augmentation sensible du débit
 - Plus de production
- **Inconvénients :**
 - plus chère à l'achat
 - réglage difficile

A.4. Théorie de broyage

Broyer c'est réduire un morceau ou particule en plusieurs morceaux, particules plus petites et suivant la loi de RITTINGER (ISO7) qui se vérifie constamment. La puissance nécessaire pour la réduction des éléments est directement proportionnelle à la nouvelle surface obtenue.

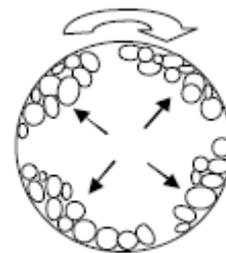
D'après la loi de RITTINGER, la puissance employée pour réduire en 64 morceaux de 1cm d'arrête sera double de celle employée pour faire les morceaux de 2 cm d'arrêtes. Donc pour obtenir un laitier ou un ciment à 6000 cm²/gr il faudra théoriquement une puissance double que pour un laitier ou ciment à 3000 cm²/gr.

A.5. Fonctionnement du broyeur



Vitesse normale :

entraînement des boulets par la paroi, puis chute



Vitesse excessive :

centrifugation des boulets contre la paroi

Figure A.1 : Fonctionnement du Broyeur

- Si la force centrifuge est égale au poids de boulet, il y a centrifugation
- Les engins broyant sont entraînés dans la rotation du broyeur à une vitesse de rotation voisine de 75% de la vitesse critique.

ANNEXE B

**EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU
MORTIER**

ANNEXE B
EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER

B.1. Les Données :

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

Les masses volumiques absolues des constituants :

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

Coefficient d'absorption du sable $A_b = 1.2$

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

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

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : $\%Sp = 1,6\%$ du poids de ciment (ou poudres).

B.2. Calcul d'humidite du sable :

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse $M_1 = 321$ grs (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 $M_2 = 320$ grs 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 :

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

B.3. Calcul des quantites de chaque constituant :

B.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:

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

B.3.2. Le Sable

La quantité du sable en kg est S

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

B.3.3. Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp :

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

B.3.4. L'eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E_1 , qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E_2 (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume : % E_{vol}

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

La quantité d'eau globale E en litre :

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

Eau1

$$E_1 = E \times 0.70$$

Eau2

$$E_2 = E \times 0.30$$

Tableau B.1 : Feuille Excel donnant composition et résultats des essais sur mortier

Essais sur Mortier				entrer data dans cellules en rouge			
				valeurs calculées dans cellules en noir			
Référence du mélange	Essai 3	CEM I 42,5 + 15% de Laitier		Date :	15-09-2006		
volume de mortier (litres)	1.3						
sable/mortier vol	0.5						
E/P par vol.	1.248	poudre	22.24	Eau volume (%)	27.76		
composition Poudre(vol %)		type					
ciment portland	85						
Laitier	15						
superplast - MEDAFLOW30	1.6	% (Sp/P)					
humidité sable							
	humidité (%)		orption		correction (%)		
poids humide (gms)	200	0.0	1.2	-1.2			
poids sec (gms)	200						
Materiaux/Type	vol	densité	contenance d'eau			poid mélange	
	litres	kg/m ³	kg	%	kg	kg	
ciment	0.246	3150				0.774	
Laitier	0.043	2950				0.128	
Eau	0.361	1000	0.361			0.371	W1 0.297
			total				W2 0.074
superplast - MEDAFLOW30		1100	0.014	70	0.010	0.014	
			ssd				
Sable	0.650	2645	1.719	-1.2	-0.021	1.699	
Total	1.300					2.987	
		w/p bt	0.4000				

ANNEXE C

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

ANNEXE C

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

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

C.1. Les Données

Pour un volume de béton de $V=20$ litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
 - Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) : $\rho_G = 1426 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du gravier (gravier roulé) : $\rho_{AG} = 2560 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du sable : $\rho_S = 2630 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du ciment : $\rho_C = 3150 \text{ kg/m}^3$

- Les coefficients d'absorption :
 - Coefficient d'absorption du sable : $AbS = 1.2$
 - Coefficient d'absorption du sable : $AbG = 2.18$

- Le rapport Sable/Mortier : $S/M = 0.40$
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

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

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : $A=1\%$ du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de $E/C_{\text{volume}}=1.419$ par unité de volume de ciment et $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volum}} / \rho_A = 0.45$ par unité de poids de ciment.

- Le pourcentage de superplastifiant (**MEDAFLOW30**) : $\%Sp = 1,6\%$ du poids de ciment, le **MEDAFLOW30** est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau)

C.2. Calcul d'humidite

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

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

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

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

C.3. Calcul des differents composants

C.3.1. Gravier

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

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

C.3.2. Sable

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

Le pourcentage du gravier 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
G/S de notre composition

obtenir le rapport

C.3.3. Ciment

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

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

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

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

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

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

C.3.4. Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/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 :

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

C.3.5. Eau :

L'eau ajoutée au béton (E) est divisée en deux parties : la première partie (E_1) est de 70% de (E) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E_2), elle de 30% de (E) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

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

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

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

L'eau contenu dans le sable : e_1

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

L'eau contenue dans le gravier : e_2

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

L'eau contenu 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

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

Tableau C.1 : Feuille Excel donnant composition et résultats des essais sur BAP

Composition du Mélange de BAP				entrée des data cellules en rouge					
référence:				valeurs calculées cellules en noir					
				Date	17 Fev 2007				
				mesures d'humidité					
Densités relatif	Gravier	2.6		Absorptions (%)		Pds Hum	Pds sec	% Humid	
	Sable	2.6		Gravier	1	8/15	261.2	255.1	2.39
	Ciment	3.15				3/8	205.84	200.03	2.90
	Fines	2.68		Sable	1.2	Sable	198.9	187.13	6.29
gravier									
Densité		1680	kg/m ³	% gravier	32.3	vol % de béton			
percent		50		Gravier	840	kg/m3			
8/15:3/8		2.00		8/15	560	kg/m3			
				3/8	280	kg/m3			
air		1	vol % de béton						
Sable									
volume mortier	66.7	vol % de béton		% Sable	36.7	vol % de béton			
Sable	55	vol % de mortier		Sable	954	kg/m3			
pate									
volume	30.0	vol % de béton		% Eau	16.6	vol % de béton			
E/P volume	1.233			Eau	166	kg/m3			
Poudre	13.4	vol % de béton							
Ciment	85	vol % de poudre		Ciment	11.4	vol % de béton			
Fines	15	vol % de poudre		Ciment	360	kg/m3			
Densité relative	3.08								
				% Fines	2.0	vol % de béton			
E/P Poids	0.400			Fines	54	kg/m3			
superplastifiant: MEDAFLOW 30									
dosage	1.6	% liquid de poudre		superplas	6.62	kg/m3			
Mélange vol (litre:	40	litres							
Densité Béton	2380	kg/m3		Poids Mél	95.20	kg			
Poids Mélange									
	prop.mé	Pds mé	osorptic	humidité	extra eau	Poids			
	kg/m3	kg	%	%	kg	kg			
Gravier 8/15	560	22.40	1	2.39	0.31	22.71			
Gravier 3/8	280	11.20	1	2.90	0.21	11.41			
Sable	954	38.15	1.2	6.29	1.94	40.09			
Ciment	CPA (A)	360	14.39			14.39			
Fines	Laitier	54	2.16			2.16			
Eau		166	6.63						
Superpla	MEDAF	6.62	0.26	80	0.21	0.265			
composition eau						3.95	eau 1	2.765	
							eau 2	1.185	
total		2380	95.2		2.68	94.98			

ANNEXE D

**DONNÉES RELATIVES À L'ESSAI DE LA CHALEUR
D'HYDRATATION POUR MORTIER**

ANNEXE D
DONNÉES RELATIVES À L'ESSAI DE LA CHALEUR D'HYDRATATION
POUR MORTIER

1/ Températures des mélanges de mortier en fonction du temps

Tableau D.1 : Valeurs de Température des mélanges de mortier en fonction du temps

Temps (en Heure)	0% Laitier	10% Laitier	15% Laitier	20% Laitier	25% Laitier
2,00	23,30	22,70	20,50	20,00	18,20
4,00	23,50	22,80	20,60	20,10	18,40
6,00	23,70	22,80	20,70	20,20	18,60
8,00	24,00	23,00	20,80	20,40	18,90
10,00	24,20	23,10	21,00	20,50	19,20
12,00	24,70	23,30	22,00	20,90	19,50
14,00	25,80	23,80	22,20	21,50	19,90
16,00	28,30	26,60	22,40	21,90	20,20
18,00	33,40	32,70	23,40	22,10	20,70
20,00	40,20	38,40	25,50	22,60	21,10
22,00	45,10	43,30	30,00	23,50	21,40
24,00	47,90	46,90	33,80	25,70	22,40
26,00	49,50	48,30	35,80	27,10	22,90
28,00	50,60	49,30	38,00	29,00	24,20
30,00	51,30	50,20	40,20	31,10	25,90
32,00	51,80	50,50	42,00	35,20	28,50
34,00	52,00	50,60	44,50	38,00	31,80
36,00	51,80	50,50	45,30	39,80	34,00
38,00	51,40	50,40	46,40	41,00	36,30
40,00	50,90	50,10	46,30	41,70	38,00
42,00	50,10	49,00	45,80	42,20	39,40
44,00	49,30	47,80	44,10	42,20	40,80
46,00	48,30	45,80	43,00	42,00	41,20
48,00	47,50	43,80	41,00	41,80	40,90
50,00	46,50	42,90	39,90	41,50	40,70
52,00	45,50	41,90	38,60	40,80	40,40
54,00	44,50	40,00	37,20	40,00	39,50
56,00	43,50	39,00	34,70	39,10	38,00

58,00	42,60	37,60	32,00	38,00	36,00
60,00	41,70	36,30	29,90	36,80	34,30
62,00	40,80	35,80	28,80	36,20	33,50
64,00	39,90	35,00	28,00	36,00	32,80
66,00	39,00	34,20	27,10	34,00	32,00
68,00	38,20	33,90	27,00	33,00	29,00
70,00	37,40	33,00	26,20	30,00	27,00
72,00	36,60	32,70	25,50	26,00	26,00

2/ Détermination des différents coefficients permettant le calcul de la Chaleur d'Hydratation

M_c (g) : masse de ciment ou de liant contenu dans l'éprouvette

C (J/°C) : capacité thermique totale du calorimètre et de l'éprouvette

α (J/h°C) : coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre donné par étalonnage

$\Delta\Theta$ (°C) : échauffement de l'éprouvette par rapport à la température ambiante

avec

$\alpha = a + b\Delta\Theta$ (les coefficients a et b sont fournis par le constructeur du calorimètre)

Les caissons utilisés dans notre étude ont les coefficients suivants :

le caisson N°1 a pour coefficients $a = 53,8$, $b = 0,216$, $\mu = 428$ (J/°C)

le caisson N°3 a pour coefficients $a = 55$, $b = 0,23$, $\mu = 431$ (J/°C)

Le premier terme représente la chaleur accumulée dans le calorimètre, le second la chaleur dissipée vers le milieu extérieur.

C est calculé par l'équation :

$$C = 0,75 (m_l + m_g) + 3,76m_e + 0,5m_b + \mu \quad (14)$$

avec

$0,75 \text{ (J/}^\circ\text{Cg)}$: capacité thermique massique du ciment et du sable

$3,76 \text{ (J/}^\circ\text{Cg)}$: capacité thermique massique de l'eau d'hydratation

$0,5 \text{ (J/}^\circ\text{Cg)}$: capacité thermique massique de la boîte (moule en carton et accessoires)

$\mu \text{ (J/}^\circ\text{C)}$: capacité thermique du calorimètre vide

$m_l \text{ (g)}$: masse liant (ciment + Laitier)

$m_g \text{ (g)}$: masse des granulats (sable + gravier)

$m_e \text{ (g)}$: masse d'eau

$m_b \text{ (g)}$: masse du moule en carton et des accessoires

