

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Magister

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil et d'Hydraulique

Spécialité : Matériaux et structures

Option : Mécanique et durabilité des matériaux

Présenté par : HADRI Samia

***Thème : Le passage d'un Béton à Haute Performance à un
Béton Autoplaçant Haute Performance***

Sous la direction du : Dr. BENMARCE Abdelaziz

JURY

Prof. GUENFOUD Mohamed

Dr. BENOUIS A/Halim

Dr. NAFAA Zahreddine

Président

Examineur

Examineur

Université de Guelma

Université de Guelma

Université de Guelma

Année 2012

Remerciement

Au Nom De Dieu Le Clément ET Le Miséricordieux

Je remercie Dieu le tous puissant de me avoir donné, courage et santé pour l'élaboration de ce modeste travail.

*J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur **BENMARCE Abdelaziz**, mon directeur de Thèse,
Professeur à l'université de Guelma.*

*Je le remercie de m'avoir honorer en acceptant de m'encadrer; de m'avoir fait profiter de sa compétence,
pour son aide considérable, ses conseils au long de ce travail.*

Je remercie Vivement:

*Mr. Pr. **GUENFOUD Mohamed** à l'université de Guelma Président*

*Mr. Dr. **BENOUIS A/Halim** à l'université de Guelma Examineur*

*Mr. Dr. **NAFAA Zahreddine** à l'université de Guelma Examineur*

D'avoir accepté de rapporter ce travail

Sincèrement à:

Je tiens à exprimer ma gratitude au responsable scientifique de cette post-graduation au

*Directeur Prof: **GUENFOUD Mohamed** et membres de laboratoire de Génie Civil et D'Hydraulique
(LGCH) à l'université de Guelma, Mr Khrouf Mazouze Chef de département de Génie civil.*

Tous les responsables du centre de calcul: Guerguch Chérif, A/ Aziz, Mehdi, M^{elle} Salima, Ksouri Lynda.

Pour leur sympathie et générosité.

Tous les enseignants de département de Génie Civil de Guelma.

Je remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribue et aidé à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail de tout mon cœur à ceux qui m'ont soutenu et encouragé de loin et de près à l'intérieur et l'extérieur.

Je l'offre avec tendresse et amour par ordre sentimental :

A ma raison de vivre ma mère, l'étoile qui m'a éclairé les moments les plus dures de ma vie, celle qui m'a redonné l'espoir et m'a encouragé. Je lui souhaite une longue vie pleine de bonheur.

A mon cher papa pour sa contribution depuis ma naissance jusqu'à mon objectif souhaité.

A mon petit ange qui m'a éclairé ma vie : Ahmed bahaeddine

A mon époux « Rachid » qui il m'a encouragé, il a fait preuve de beaucoup de patience et de sacrifices.

A mon frère « Khaled » que je lui souhaité un prospère avenir.

Ames sœurs : Amel, Wided, Samiha, Meriem.

A qui sont entre les lignes je les remercie très fort pour leur aide :

Guerguch Chérif Et Bessoudi Nacira

Un mot de remerciement à tous mes collègues qui à un moment ou un autre ont su être là par leur présence amicale ou par leur aide.

Résumé

Les bétons à hautes performances (BHP) sont des bétons qui développent des résistances mécaniques élevées (entre 60 et 80 MPa) du fait de leur faible porosité, leur haute compacité et leur durabilité accrue grâce à une perméabilité réduite aux agents agressifs chimiques extérieurs.

L'objectif de ce travail de recherche est l'amélioration des propriétés rhéologiques du BHP, fabriqués à partir de matériaux locaux, et alliant résistance et ouvrabilité sans modification des performances mécaniques. L'étude du passage d'un BHP à un BHP autoplaçant (BHP-AP), nécessite une bonne connaissance des paramètres de formulation tels que la fraction volumétrique solide ϕ et le rapport Gravillon/Sable. L'étude rhéologique des phases suspendantes du béton a mis en évidence la coexistence ciment fillers – fines – Superplastifiant. Divers essais rhéologiques seront donc réalisés pour identifier les paramètres intrinsèques de ces suspensions. Vingt et une éprouvettes ont été testées pour chaque échéance d'essai. Tous les différents essais ont eu lieu au sein du laboratoire LGCH. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du dosage en superplastifiant peut donner un BAP HP, malgré la différence importante dans la composition de ces deux bétons.

MOTS CLES :

Béton à Haute Performance, Béton Autoplaçant, Béton Autoplaçant à Hautes Performances (BAP-HP), Formulations, Performances Mécaniques, Propriétés Rhéologiques, Superplastifiant, constituants locaux.

Abstract

High performance concrete (HPC) is a concrete that develop high mechanical strength (between 60 and 80 MPa) to the decrease of porosity made possible thanks to the superplasticizers to reduce water content required for obtaining a sufficient maneuverability. Moreover, the used spectrum of granular mixture is expanded by the addition of ultrafine elements that give the whole a high compacity.

Thus, these concrete do have an increased durability (Mali, 1991) due to a reduced permeability to aggressive chemical field. The objective of this research is to improve the rheological properties of high performance concrete (60 to 80 MPa) without changes in mechanical performance. The study of the transmit stage from HPC to High Performance Self Compacted Concrete HPS-CC (fluidity and ability to transition between frames) in mixture design forms of parameters such as solid volume fraction ϕ and Gravel/Sand ratio. The rheological study of the suspending phases of the concrete showed coexistence cement fillers - fines – superplasticizers. Various rheological tests were made to identify the intrinsic parameters of the suspensions. All tests were performed at the laboratory of Civil Engineering and Hydraulics (LGCH) Although the big difference between the concretes, this experimental work showed that increasing the amount of superplastizer can provide a HPS-CC.

KEYWORDS:

High Performance Concrete (HPC), Concrete (SCC), High Performance Self-Compacted Concrete (HPS-CC), Formulations, Mechanical Performance Rheological Properties, Superplasticizers, Local Constituents.

ملخص

الخرسانات ذات فعالية عالية هي الخرسانات التي تعطينا ارتفاع في القوى الميكانيكية (ما بين MPa 60 و MPa 80)، نتيجة لانخفاض المسامية بفضل إضافة Superplastifiant للحد من المياه المطلوبة للمحتوى و للحصول على ما يكفي من القدرة الكافية، زيادة على ذلك، طائفة من خليط محبب مستخدم يتم توسيعه عن طريق إضافة عناصر متناهية الصغر وبالتالي فإن هذه الخرسانات تمثل ديمومة زائدة (نتيجة لانخفاض النفاذية في المناطق الخارجية و العدوانية كيميائيا).

والهدف من هذا البحث هو تحسين الخصائص الانسيابية للخرسانات فعالية عالية (60 إلى 80 MPa) دون تغيير في القوى الميكانيكية من دراسة المرور من خرسانة فعالية عالية نحو خرسانة ذاتية التوضع ذات فعالية عالية، يتطلب خصائص جيولوجية (السيولة والقدرة على الانتقال بين التسليح) بدلالة تركيبة الخرسانات، مثل وحدة الحجم الصلبة الجزئي ρ وتقرير الحصى/ الرمل. الدراسة الانسيابية المتعلقة بالمرحل الخرسانية تعتمد على الإسمنت المواد المساعدة - الحبيبات الرقيقة- superplastifiant. مختلف الاختبارات الانسيابية التي ينبغي إعدادها لتحديد المعايير الأساسية المتعلقة بتقييم مدى تميز المتغيرة الانسيابية واستقرارها. هذا العمل سوف يوفر لنا الظواهر الفيزيائية الأساسية للمحتوى في الظروف العادية للمواد - المادة السائلة و سيقدم لنا فهم أفضل لتغيرات المحتوى وعواقبه.

الكلمات الأساسية:

الخرسانات ذات فعالية عالية (BHP)، الخرسانات ذاتية التوضع (BAP)، الخرسانات ذاتية التوضع ذات فعالية عالية (BAP-HP)، تحضيرات، فعاليات ميكانيكية، خصائص انسيابية Superplastifiant مكونات محلية.

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Les propriétés essentielles des BAP frais.....	28
Tableau II.2 : Classification des BAP selon leur application.....	38
Tableau III.1: Exigences mécaniques garanties des ciements (Normes NA442).....	54
Tableau III.2 : Analyse granulométrique du sable.....	59
Tableau III.3 : Résultats des essais physiques sur le sable.....	60
Tableau III.4 : Analyse granulométrique du gravier 5/12.....	61
Tableau III.5 : Résultats des essais physiques sur le gravier 5/12.....	62
Tableau III.6 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.....	63
Tableau III.7 : Masse volumique réelle et coefficient d'absorption du gravier G8/16.....	64
Tableau III.8 : Valeur de la dureté au Los Angeles du gravier utilisé.....	64
Tableau III.9 : Composition chimique moyenne du ciment CPJ CEM II/A utilisée.....	65
Tableau III.10: Caractéristiques physiques du ciment utilisé.....	65
Tableau III.11 : Composition chimique de la fumée de silice.....	67
Tableau III.12 : Propriétés physiques de la fumée de silice.....	67
Tableau III.13 : Evolution des résistances mécaniques du béton contenant le Medaflow30.....	69
Tableau III.14 : Compositions et paramètres de formulation des bétons d'étude.....	71
Tableau III.15: Récapitulatif des résultats des essais d'étalement au cône.....	72
Tableau III.16 Récapitulatif des résultats des essais à la boîte en L.....	73
Tableau III.17 : Critères d'acceptabilité pour l'essai de stabilité au tamis.....	74
Tableau III.18: Résultats des mesures de la stabilité des bétons.....	74
Tableau III.19 : Temps d'écoulement au V funnel des bétons.....	75
Tableau III.20: Formulations retenues de différents bétons.....	82
Tableau IV.1 : Désignations et notations des bétons retenus.....	83
Tableau IV.2 : Compositions des bétons étudiés.....	84
Tableau IV.3 : Résistance à la compression sur éprouvette (10x10x10)cm ³ , exprimées en MPa	86
Tableau IV.4 : Comparaison des valeurs de résistances à la compression déduites à partir des expressions du CBA93 (expressions IV.2) avec celles des résistances mesurées	89
Tableau IV.5 : Résistance à la traction par fendage, exprimées en MPa.....	90
Tableau IV.6: comparaison des résistances à la traction par fendage mesurées et celles calculées par l'expression IV.3.....	91

Liste des figures

Figure II.1 : Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la floculation.....	5
Figure II.2 : Les superplastifiants empêchent la floculation	6
Figure II.3 : Granulométrie des matières fines	7
Figure II.4 : Béton ordinaire	8
Figure II.5 : BHP	8
Figure II.6 : Bétons ordinaire: fissures d'adhérence et fissures dans le mortier	17
Figure II.7 : Béton à haute performance: les granulats sont également fissurés.....	18
Figure II.8 : Diagramme contraintes – déformations	18
Figure II.9 : Diagramme contraintes – déformations	25
Figure II.10 : Phénomène de blocage d'un granulat au droit d'un obstacle	25
Figure II.11 : Détermination de l'étalement d'un BAP au cône	30
Figure II.12 : Représentations schématique et photographique de l'essai de boîte en L.....	31
Figure II.13 : Représentation de l'essai de stabilité au tamis.....	31
Figure. II.14 : Essai d'entonnoir utilisé pour mesurer le temps d'écoulement du béton.....	32
Figure II.15 : Mise en place aisée de BAP par un seul ouvrier : au moyen d'une benne dans le cas d'une dalle ou d'une benne munie d'un tube dans le cas d'un mur.....	34
Figure II.16 : Coulage Autoplaçant (béton précontraint).....	34
Figure II.17 : Eléments préfabriqués en BAP à haute résistance.....	35
Figure II.18 : Domaine de classification des bétons étendus au BAP[6].....	36
Figure II.19 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [32].....	39
Figure II.20 : Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [10].....	40
Figure II.21 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides (d'après[30]).....	41
Figure II.22 : Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant d'après[31].....	41
Figure. II.23 : Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré d'après[13].....	42
Figure II.24 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC)et d'un BV (REF) correspondant[17].	43
Figure II.25 : Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP [32].....	44
Figure II.26 : Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés[25].....	47
Figure II.27 : Retraits endogène et total d'un béton vibré et de deux BAP de résistance 60MPa[27].....	48
Figure II.28 : Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC) et BAP (SCC) en fonction de la résistance mécanique à 28 jours[19].....	48

Figure II.29 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP[26].....	49
Figure III.1 : Aperçu des granulats utilisés.....	56
Figure III.2 : L'eau potable convient comme eau de gâchage.....	57
Figure III.3 courbe granulométrique du sable.....	59
Figure III.4 : Courbe granulométrique du gravier G 5/12.....	61
Figure III.5 : Courbe granulométrique du gravier G 8/16.....	63
Figure III.6 Ciment CPJ CEM II/A 42,5 (C) utilisé.....	66
Figure III.7 Le Medaplast HP utilisé.....	67
Figure III.8 Super plastifiant utilisé.....	68
Figure III- 9 : Exemple de mesure de l'étalement.....	72
Figure III -10 : Exemple de mesure de la fluidité à la boîte en L pour le B5.....	73
Figure III.11 : photos illustrant l'essai de stabilité au tamis.....	74
Figure III.12 : Mesure du temps d'écoulement du B ₅	75
Figure III-13 : Etalement au cône d'Abrams de tous les échantillons confectionnés.....	76
Figure III.14 : Etalement en fonction du % en Superplastifiant.....	76
Figure III.15 : Fluidité des différents bétons confectionnés.....	77
Figure III.16 : Stabilité au tamis des différents bétons confectionnés.....	78
Figure III-17 : Ecoulement à l'entonnoir (V funnel) des bétons confectionnés.....	78
Figure III.18 : Influence de la variation du dosage en Superplastifiant sur l'étalement des bétons.....	79
Figure III.19 : Influence de la variation du dosage en Superplastifiant sur la ségrégation dynamique.....	80
Figure III.80 : Influence de la variation du dosage en Superplastifiant sur la résistance à la ségrégation statique.....	80
Figure III.21 : Influence du dosage en Superplastifiant sur le temps d'écoulement à l'entonnoir.....	81
Figure IV.1 : Malaxage du béton.....	85
Figure IV.2 : Corps d'épreuves utilisés.....	85
Figure IV.3 : Variation de la charge appliquée par la machine dans le temps.....	87
Figure IV.4 : Evolution de la résistance à la compression dans le temps.....	88
Figure IV.5 : Influence du dosage en Superplastifiant sur la résistance en compression.....	89
Figure IV.6 : Evolution de la résistance à la traction par fendage dans le temps.....	90
Figure IV.7 : Processus de rupture des éprouvettes en compression pour le BAP-HP ₅	91

Sommaire

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

I. INTRODUCTION	1
-----------------------	---

CHAPITRE II : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

A/ LES BETONS A HAUTES PERFORMANCES

II. 1 INTRODUCTION	4
II.2 HISTORIQUE DES BHP	4
II.2.1 Évolutions des BHP:.....	4
II.3 MODES ET FORMULATIONS DES BHP	8
II.3.1 Définition des BHP.....	8
II.3.2 Formulation, constituants:.....	8
III.3. 2.1 Les étapes de la formulation.....	9
II.3.2.2 L'optimisation de la formulation d'un BHP.....	9
II.3.3 Quelques exemples de la formulation des BHP.....	10
II.3.4 Spécifications sur les constituants.....	11
II.3.5 Avancées récentes.....	11
II.4 PROPRIETES DES BETONS A L'ETAT FRAIS ET SA MISE EN ŒUVRE	12
II.4.1. Introduction.....	12
II.4.2 Contrôle de la masse volumique.....	13
II.4.3 Contrôle de l'affaissement.....	13
II.4.3.1 Mesure.....	13
II.4.3.2 Facteurs influençant l'affaissement:.....	14
II.4. 4 Amélioration de La rhéologie du béton frais:.....	14
II.4.5. Perte d'affaissement.....	14
II.4.6 Performances des BHP des propriétés exceptionnelles à l'état frais:.....	15
II.4.7 Mise en œuvre.....	16
II.4.7.1. La Cure.....	16
II.5 PROPRIETES DU BETON DURCI	17
II.5.1. Propriétés physico-chimiques et mécaniques des BHP.....	17
II.5.1.1. Effets de la température sur le béton en cours de durcissement.....	17
II.5.1.2 Comportement en compression.....	17
II.5.1.3 Comportement en traction.....	19
II.5.1.5 Rigidité.....	19
II.5.1.6. Retrait.....	19
II.5.1.7 Le Fluage.....	21
II.5.1.8. Perméabilité.....	22
II.5.1.9. Durabilité.....	22
II.5.1.10 Résistance aux agents agressifs.....	22
II.5.1.11 Migration des ions chlorure.....	22
II.5.1.12 Tenue aux attaques gel/dégel.....	22
II.5.1.13 Résistance au feu.....	23
II.5.1.14 Carbonatation.....	24
II.5.1.15 Adhérence Acier-Béton.....	24
II.5.1.16 Réduction des flèches et des déformations des structures :.....	24
II.5.1.17. Propriétés thermiques.....	24

B- LES BETONS AUTOPLAÇANTS.....	24
II-1 INTRODUCTION.....	24
II.2 Historique des BAP.....	26
II.2 Définition des BAP.....	26
II.3 Principaux essais de caractérisation et contrôle de la rhéologie des BAP.....	26
II.3.2 Essai et caractérisation des BAP.....	29
a- Essai d'étalement (Slump-Flow).....	29
b- Essai de boîte en L (L-Box).....	30
c- Essais de stabilité au tamis.....	31
d- Essai d'entonnoir (V-Funnel).....	32
II.4- Avantages attendus liés à la fluidité des BAP.....	32
II.5- Mise en œuvre des BAP.....	33
II.6- Domaine d'emploi.....	34
II.7- Formulation des BAP.....	31
II.7.1 Formulations des BAP existants dans la bibliographie.....	37
II.7.2 Cahier de charge minimum à l'état frais.....	37
II.7.3 Particularité de la composition des BAP.....	38
II.7.3 Particularité de la composition des BAP.....	39
II.8 – PROPRIETES DES BAP A L'ETAT DURCIS.....	42
II.8.1. Propriétés mécaniques.....	43
II.8.1.1 Résistance mécanique.....	43
II.8.1.2. Retrait (état frais, état durci).....	44
II.9- CONCLUSION.....	50

CHAPITRE III : *Formulation et Caractérisation* *Des BAP-HP*

III.1- GENERALITES SUR LES CONSTITUANTS DU BETON.....	51
III.1.1- Le ciment.....	51
III.1.1.1- Classification normalisée du ciment.....	51
III.1.2- Les granulats.....	55
III.1.2.1. Le gravier.....	56
III.1.2.2. Le sable.....	56
III.1.3- L'eau de gâchage.....	57
III.1.4- Les adjuvants.....	57
III.2- CHOIX ET CARACTERISATION DES CONTITUANTS DE BASE DES BETONS D'ETUDES.....	58
III.2.1- Sable.....	59
III.2.2- Gravier.....	60
III.2.3- Le ciment.....	65
III.2.4- L'eau de gâchage.....	66
III.2.5- Medaplast HP(fumée de silice).....	66

III.2.6.1- Le superplastifiant MEDAFLOW30.....	68
III.2.-MATERIAUX ET FORMULATION DES BETONS D'ETUDES.....	69
III.2.1- Matériaux utilisés.....	70
III.2.2- Formulation des bétons autoplaçants	70
III.2.2.1- Formulation de départ.....	70
III.2.2.2- Détermination des compositions des différents BAP	70
III.3- GACHEES D'ESSAIS ET CARACTERISATION DES BETONS A L'ETAT	
FRAIS	71
III.3.1- Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow).....	72
III.3.2- Essai de la boîte en L.....	72
III.3.3- Essai de stabilité au tamis	73
III.3.4- Essai d'entonnoir	74
III.3.5- Résultats et discusion.....	75
III.4- INFLUENCE DU RAPPORT E/L_{eq} SUR LE COMPORTEMENT	79
DES BAP A L'ETAT FRAIS	79
III.4.1- Influence du rapport E/Leq sur l'étalement des bétons.....	79
III.4.2- Influence du rapport E/L _{eq} sur la ségrégation dynamique (H ₂ /H ₁).....	80
III.4.3- Influence du rapport E/L _{eq} sur la résistance à la ségrégation statique et le	80
ressuage.....	80
I.4.4- Influence du rapport E/L _{eq} sur le temps de l'écoulement à l'entonnoir....	81
IV.5- CONCLUSION	81

CHAPITRE IV : *Caractérisations Mécaniques* ***Des Compositions Retenues***

IV.1- INTRODUCTION	83
IV.2- COMPOSITION DES BETONS ETUDIÉS	83
IV.2.1- Propriétés étudiées.....	83
IV.2.2- Formulation des bétons étudiés.....	83
IV.2.3- Conduite des essais.....	84
IV.2.3.1- Malaxage et mise en place	84
IV.3- RESULTATS ET DISCUSSIONS	86
IV.3.1- Performances mécaniques.....	86
IV.3.1.1- Résistance à la compression.....	86
IV.3.1.2- Résistance à la traction par fendage.....	90
IV.4- CONCLUSION	92

CHAPITRE V : *Concluions Générales Et Perspectives*

Chapitre I:

Introduction Générale

I. Introduction Générale

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque là destiné. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BFM) et les bétons de poudre réactive (BPR).

Les (BHP) sont des bétons qui développent des résistances mécaniques élevées (supérieure à 60MPa) du fait de la diminution de la porosité rendue possible grâce à l'ajout de superplastifiants qui diminuent la teneur en eau nécessaire à l'obtention d'une maniabilité suffisante. De plus, le spectre du mélange granulaire utilisé est élargi par l'ajout d'éléments ultrafins qui confèrent à l'ensemble une haute compacité [1]. De ce fait, ces bétons présentent une durabilité accrue [2] grâce à une perméabilité réduite

La plupart des ouvrages d'art dans lesquels sont utilisés des BHP, présentent souvent des ferraillements très denses (supérieurs à 200 kg/m³) associés à la présence de gaines de précontrainte.

Les bétons Autoplaçant (BAP) sont reconnus pour leur très grande déformabilité et leur facilité de mise en œuvre sous l'effet de leur poids propre, sans nécessiter de vibration, même en présence de ferraillements très denses selon Association Française de Génie Civil (AFGC, 2000) [3]. Il est intéressant de rappeler que les bétons, de manière générale, sont des fluides à seuil : ils ne s'écoulent que si la contrainte qui leur est appliquée est supérieure à leur seuil d'écoulement. D'un point de vue essai empirique, ceci correspond à un étalement de 600mm.

Cependant, malgré les aspects intéressants qu'ils proposent en particulier Résistance mécanique très élevée des BHP, Il faut accorder beaucoup d'importance à la mise en place et à la finition des BHP parce que de tels bétons ne doivent pas être forcément places et finis de la mise en façon qu'un béton usuel. Même si les BHP ont en général un affaissement très élevé, il faut absolument prévoir une vibration interne ou externe pour faciliter la mise en place et améliorer la performance et l'apparence des surfaces du béton. Les BHP sont caractérisés pas des propriétés mécaniques et de durabilité uniques, liées entre autre à leur formulation avec une faible teneur en eau. Pour compenser cette faible teneur en eau et faciliter la mise en œuvre du matériau à l'état frais, on a souvent recours à des adjuvants super fluidifiants. Cependant, vu sa très faible teneur en eau, les BHP à l'état frais reste très peu visqueux comparés aux BAP. Malheureusement ces derniers sont caractérisés par d'assez mauvaises propriétés mécaniques à l'état durci.

Cette étude a été menée de répondre aux plusieurs questions dont certaines concernant l'évolution des propriétés rhéologiques du béton à hautes performances.

Objectif et présentation de l'étude.

L'objectif de notre étude était de concilier les propriétés d'un BHP (grande résistance à la compression et la traction, une grande durabilité, etc.) avec les propriétés rhéologiques d'un BAP (fluidité accrue, etc...); c'est-à-dire arriver à formuler un béton Autoplaçant à haute performances BAP-HP.

Notre mémoire a été organisé de la manière suivante:

*Une introduction générale est donnée dans **le premier chapitre**, avec la problématique ainsi que l'objectif à atteindre dans ce travail expérimental.*

***Le deuxième chapitre** est une synthèse bibliographique sur les BHP et les BAP. Ainsi est passé en revue la définition, les méthodes de formulations, les essais de*

caractérisation, les propriétés rhéologiques à l'état frais, les propriétés mécaniques, la durabilité ainsi que quelques exemples d'ouvrages réalisés grâce aux performances de ces deux types de bétons. Ce chapitre est clos par une orientation générale de notre thèse.

Le troisième chapitre a été consacré aux :

- 1. choix et à la caractérisation des constituants de bases du béton. Ainsi sont présentés quelques essais de caractérisation des sables, des gravier, et de la fumée de silice.*
- 2. formulation et la caractérisation des bétons d'étude en jouant essentiellement sur le facteur "dosage en Superplastifiant", les autres paramètres ont été fixés. Ainsi des essais de compression ont été entrepris sur des éprouvettes cubiques à différentes âges. Cette étude nous à permis de déterminer également la loi de comportement ainsi que les processus de rupture des bétons testés.*

Le quatrième chapitre est consacré aux caractérisations mécaniques des compositions retenues. Ainsi des essais de compression et de traction ont été entrepris sur des éprouvettes cubiques à différentes âges. Cette étude nous à permis de déterminer également la loi de comportement ainsi que les processus de rupture des bétons testés

Le cinquième chapitre est clôturé par Une conclusion générale avec des perspectives.

Chapitre II:

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE



II. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

A/ LES BETONS A HAUTES PERFORMANCES

II.1 INTRODUCTION

Les bétons à hautes performances (BHP) sont des bétons qui développent des résistances mécaniques élevées (plus de 60 MPa) du fait de la diminution de la porosité rendue possible grâce à l'ajout de super plastifiants qui diminuent la teneur en eau nécessaire à l'obtention d'une maniabilité suffisante. De plus, le spectre du mélange granulaire utilisé est élargi par l'ajout d'éléments ultrafins qui confèrent à l'ensemble une haute compacité [1]. De ce fait, ces bétons présentent une durabilité accrue [2] grâce à une perméabilité réduite.

II.2 HISTORIQUE

Le BHP est à l'origine une appellation française qui s'est aujourd'hui généralisée dans le monde. Il s'agit de bétons créés au milieu des années 70 pour la construction de bâtiments de grande hauteur aux Etats-Unis ou au Canada et en Europe du Nord, notamment en Norvège, pour la réalisation de plates-formes offshore. Dans ces pays, on travaillait davantage sur le concept de haute résistance, c'est-à-dire sur la fabrication des bétons possédant des caractéristiques très élevées à 28 jours.

II.2.1 Évolutions des BHP:

Les avancées technologiques seront dans les bétons autoplaçants et les Bétons Fibrés à ultra Hautes Performances (BFUHP). Pour les premiers, il ne s'agit plus de travailler la résistance ou la durabilité mais d'améliorer la mise en oeuvre. Quant aux BFUHP, ils constituent un matériau qui permet de s'affranchir de tout ferrailage passif et d'obtenir des résistances de 150 à 200 MPa grâce à une granulométrie très fine. Concernant les BHP, il reste à travailler sur leur résistance au feu.

La question du BHP est très vaste ; elle recouvre tous les aspects le différenciant du béton traditionnel, c-à-d. des changements relatifs tant aux composants, à la composition, à la mise en oeuvre qu'aux propriétés.

Des années durant, la fabrication du béton n'a nécessité que des granulats, du ciment et de l'eau. Ce dernier composant remplit un double rôle : il permet l'hydratation du ciment et confère

au béton frais sa nécessaire ouvrabilité. Cette ouvrabilité nécessite cependant une quantité d'eau supérieure à ce qui est strictement nécessaire pour l'hydratation. Une partie de cette eau pour un rapport eau-ciment de 0,5, elle équivaut à environ la moitié de l'eau de gâchage et reste dans le béton au terme du processus de prise et de durcissement. Elle se répand dans tout le béton et cause l'apparition d'un réseau de pores et de vides. L'augmentation de l'excédent en eau est proportionnelle au diamètre moyen des pores ainsi que de leur volume. Un nombre accru de pores de plus grandes dimensions affaiblit la structure du matériau et réduit dès lors la résistance du béton. Il y donc un lien direct entre la résistance à la compression et l'eau de gâchage ajoutée au béton ou – formulé de manière plus scientifique – entre la résistance à la compression et le rapport entre la quantité d'eau et de ciment, que l'on appelle le rapport eau-ciment, E/C. En fonction de l'augmentation ou de la diminution de ce rapport, la résistance du béton diminuera ou augmentera.

La durabilité du béton augmente donc avec la réduction du volume des pores (porosité réduite, compacité accrue) et du rétrécissement des pores (réduction de la perméabilité). Il s'ensuit que le rapport eau-ciment doit être le plus faible possible.

Les superplastifiants

La découverte des plastifiants et plus particulièrement de superplastifiants très puissants dans les années 1970 a constitué un véritable tournant. L'effet de ces adjuvants est de rendre le béton nettement plus liquide, sans ajouter d'eau.

La surface de chaque grain de ciment contient des charges électriques libres. Les charges opposées s'attirent mutuellement. Au contact de l'eau, les grains s'agglomèrent alors en floculats. L'eau de gâchage qui se trouve entre ces floculats sera toutefois emprisonnée (figII.1). A partir de ce moment, elle ne contribuera plus à la fluidité de la pâte de ciment. L'ajout d'une quantité supplémentaire d'eau de gâchage sera nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée.

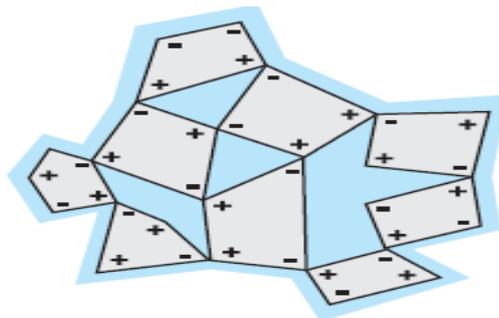
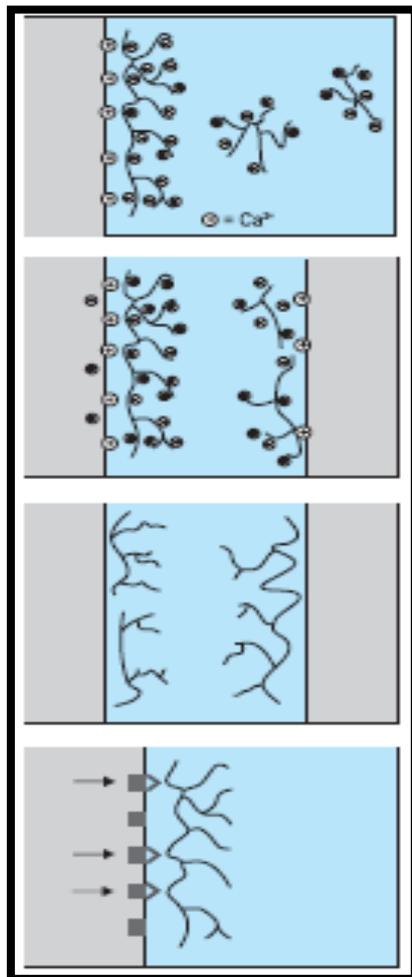


Figure II.1 Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la floculation

Les superplastifiants empêchent la formation néfaste des congglomérats (fig II.2). Les molécules du superplastifiant se fixent par adsorption sur l'interface entre le grain de ciment et l'eau de gâchage. Une fois adsorbé, le superplastifiant forme une charge négative autour de chaque grain de ciment. Ce faisant, les grains se repoussent les uns des autres. La dispersion qui en résulte réduit la viscosité de la pâte de ciment et augmente l'ouvrabilité. La structure moléculaire du superplastifiant – sous la forme de longues chaînes – renforce également cet effet. Les molécules fixées les unes aux autres pour former des spirales avec des ramifications dans différentes directions s'enroulent entre les grains de ciment et empêchent de la sorte leur rapprochement réciproque. Grâce aux structures de polymères modernes 'en forme de peigne', il est possible de réduire le rapport eau-ciment à moins de 0,3. La seule utilisation d'un superplastifiant permet également d'obtenir des résistances à la compression d'environ 80 MPa.



a/ Absorption des molécules du plastifiant à l'interface entre le grain de ciment et l'eau.

b/ Répulsion électrostatique de deux particules de ciment

c/ Encombrement stérique

d/ Réaction chimique aux sites les plus réactifs

Figure II.2 Les superplastifiants empêchent la floculation

1. Ciment
2. fines calcaires
3. ultrafines calcaires
4. ultrafines siliceuses
5. fumée de silice

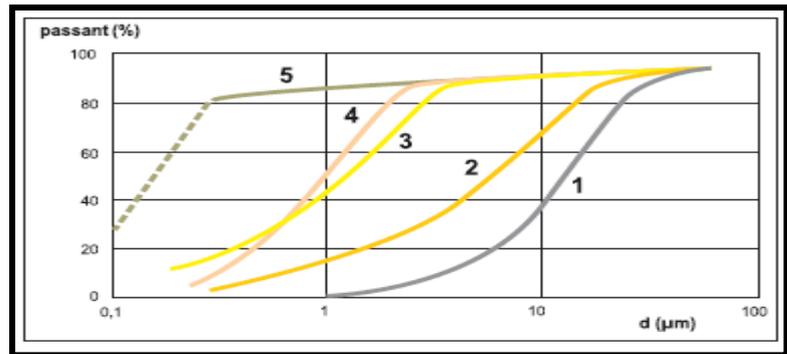


Figure II.3 Granulométrie des matières fines

La réduction du rapport eau-ciment par l'ajout d'un superplastifiant permet d'obtenir un béton plus compact. Des études ont cependant démontré que la composition de l'importante zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment durcie demeure inchangée – c'est-à-dire qu'elle ne devient pas plus compacte. Cette zone est très poreuse et peu résistante. Sa largeur n'est que de 40 μm, mais elle joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton.

L'ajout de particules extrêmement fines permet de combler les minuscules vides dans cette zone de transition. La présence du superplastifiant est en outre essentielle pour éviter la formation de conglomérats. Parmi ces substances, citons notamment les cendres volantes, le filler calcaire, le quartz concassé, les laitiers de haut fourneau broyés et les fumées de silice. En raison de leurs petites dimensions et de leur immense surface spécifique, la fumée de silice est la plus efficace. La surface spécifique des fumées de silice oscille entre 15 000 et 25 000 m²/kg et est nettement supérieure à celle du ciment, comprise entre 350 et 500 m²/kg. Les fumées de silice disposent en outre de propriétés pouzzolaniques. Elles se lient à la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment et contribue de la sorte au développement de la résistance.

Outre le compactage de la pâte de ciment durcie autour des granulats, ces particules ultrafines assurent également un remplissage généralement plus homogène du squelette granulaire dans la zone la plus fine. La compacité augmente, ce qui améliore la durabilité. Un autre effet positif de ces additions est leur influence favorable sur la stabilité du béton frais. Cette influence est particulièrement utile lors de la fabrication de bétons à très haute ouvrabilité. La résistance d'un béton obtenue grâce à un superplastifiant et à des fumées de silice peut excéder 100 MPa.

II.3 MODES ET FORMULATIONS DES BHP

Les BHP est un matériau présentant de nombreux avantages pour son utilisation dans les structures de Génie Civil. Ses résistances mécaniques en compression et en traction sont très élevées (au-delà de 50 MPa en compression à 28 jours). Cette très grande résistance est obtenue en particulier en limitant la porosité ce qui lui confère de plus une très bonne résistance aux agressions chimiques. La faible perméabilité du BHP limite les transferts à travers le matériau et donc les effets des agressions. La formulation des BHP est une opération plus complexe que celle des bétons classiques. Le point critique consiste souvent à « marier » un ciment et un adjuvant superplastifiant, de façon à ce qu'ils conduisent à un mélange fluide (bien que de teneur en eau faible). Ainsi il sera nécessaire de connaître pour chaque adjuvant la dose de saturation, au-delà de laquelle le produit n'a plus d'effet fluidifiant supplémentaire. La résistance du béton est liée à sa porosité et à la distribution des pores capillaires. La recherche des hautes performances passe donc par la réduction de la porosité du béton.

II.3.1 Définition des BHP

Les BHP se caractérisent par :

- Une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 60 MPa.
- Un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4.
- Ils présentent une microtexture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs.

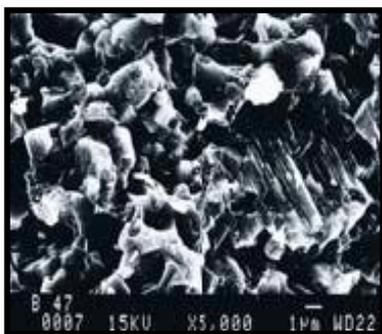


Figure II.4 Béton ordinaire



Figure II.5 BHP

II.3.2 Formulation, constituants:

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides.

En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

II.3. 2.1 Les étapes de la formulation

La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

a/ Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :

- Sélection des constituants en fonction de l'expérience locale.
- Détermination des proportions des constituants.
- Optimisation du squelette granulaire.

b/ Optimisation du mélange en laboratoire:

- Validation de la compatibilité ciment / adjuvant.
- Ajustement de la quantité de pâte et de l'adjuvantation.
- Vérification du comportement rhéologique du béton frais.
- Analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants.
- Analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en oeuvre (température).

c/ Validation de la formule:

- Vérification du comportement rhéologique du béton frais.
- Vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité.
- Vérification des caractéristiques du béton.

II.3.2.2 L'optimisation de la formulation d'un BHP

Deux voies sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP.

a/ Dégglomération des grains de ciments et réduction de la teneur en eau

L'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale (entraînant la suppression d'un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment). Les rapports E/C sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %).

Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme.

Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage (une partie de l'eau n'est plus piégée dans les floccs de ciment) tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci.

b/ Optimisation du squelette et de l'empilement granulaire

Chaque classe granulaire est adaptée afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats). Des mélanges optimaux de grains (s'appuyant généralement sur quatre niveaux de taille de grain) permettent d'obtenir la porosité minimum du squelette granulaire. Les performances des BHP peuvent encore être augmentées par l'optimisation du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultrafines, le plus souvent à caractère pouzzolanique. Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les microvides intergranulaires et en densifiant l'interface pâte de ciment granulat. Elles augmentent la compacité du mélange et améliorent sa rhéologie à l'état frais.

Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice. Elles présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique ce qui accroît les résistances mécaniques.

Cette optimisation du squelette granulaire permet aussi de réduire la teneur en eau.

I.3.3 Quelques exemples de la formulation des BHP

Les tableaux suivants présentent quelques formulations des BHP élaborés en France

QUELQUES EXEMPLES DE FORMULATION POUR 1 m ³ DE BHP			
> PONT DE JOIGNY sans fumée de silice		> PONT DE JONCHE avec fumée de silice	
CEM I 52,5	450 kg	CEM I 52,5	420 kg
Granulat 6/20	1 027 kg	Fumée de silice	35 kg
Sable 0/4	648 kg	Gravillon 6/10	250 kg
Sablon	105 kg	Gravillon 10/14	730 kg
Eau	160 l	Sable 0/4	660 kg
Superplastifiant	11,25 kg	Sablon 0/1	140 kg
Retardateur	4,50 kg	Eau	152 l
		Superplastifiant	1,73 %
> VIADUC DU CROZET avec fumée de silice		> PONT RAIL TGV MÉDITERRANÉE sans fumée de silice	
CEM I 52,5 PMES	385 kg	CEM I 52,5 R CP2	425 kg
Gravillon 5/12	363 kg	Gravillon 12,5/20	655 kg
Gravier 12/20	694 kg	Gravillon 4/12,5	500 kg
Sable 0/5	785 kg	Sable 0/4	760 kg
Fumée de silice	31 kg	Eau	140 l
Eau	140 l	Superplastifiant	1,4 %
Superplastifiant	1,2 %		

II.3.4 Spécifications sur les constituants:

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes.

- Ciments: conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 (N ou R).
- Granulats : conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XP P 18-545 (article 10: « granulats pour bétons hydrauliques »).
- Additions : conformes aux diverses normes en vigueur – cendres volantes silicoalumineuses, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).
- Adjuvants : plastifiants réducteur d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

II.3.5 Avancées récentes

Les recherches menées, cette dernière décennie, ont permis :

- la validation, la confirmation et l'appréciation de la durabilité des BHP (mise au point d'essai de mesure de la porosité, de la profondeur de carbonatation, de la pénétration des chlorures, etc.).
- la mise au point de nouveaux constituants adaptés aux BHP (fumées de silice, adjuvants de nouvelle génération, etc.).
- l'évolution dans la méthodologie et la maîtrise des formulations des BHP.

Les résultats de ces recherches se sont concrétisés par :

- la reconnaissance officielle des BHP dans les règles de calcul BAEL et BPEL (ces règles couvrent l'usage des BHP jusqu'à des résistances atteignant 80 MPa) puis actuellement dans les normes européennes de dimensionnement ces nouvelles règles permettent de prendre en compte les propriétés mécaniques des BHP dans la conception et le calcul des structures.

La prise en compte des BHP dans le Fascicule 65 :

- La mise à disposition et la généralisation des BHP dans le réseau des centrales BPE ;
- La réalisation très courante, dans les usines de préfabrication, de produits préfabriqués en béton (en BHP armé ou précontraint).

II.4 PROPRIETES DES BETONS A L'ETAT FRAIS ET SA MISE EN ŒUVRE

II.4.1. Introduction

Il est important de contrôler les propriétés d'un BHP frais pour deux raisons : un BHP doit pouvoir être mise en place aussi facilement qu'un béton usuel et un BHP qui a des propriétés à l'état frais bien contrôlées et constantes aura très probablement des propriétés tout aussi contrôlées à l'état durci. Et comme la marge de manœuvre est beaucoup plus faible lorsque l'on fabrique un BHP, Il faut porter une attention plus grande au contrôle des propriétés des BHP à l'état frais. Les propriétés d'un BHP à l'état frais doivent être contrôlées à la fois à la centrale juste après le malaxage et sur chantier juste avant la mise en place du béton.

Le contrôle des propriétés du béton a l'état frais à la centrale permet d'éviter un certains nombre de problèmes de livraison et de mise en place du béton. La rhéologie des BHP qui ont un faible rapport eau/liant est très sensible à tout chantier de la qualité des matériaux, la formulation du béton et de la température de livraison. Les principaux problèmes auxquels on peut avoir à faire face sont :

- Une chute dramatique de l'affaissement.
- Un retard de prise et de durcissement qui retarde les gains de mûrissement.
- Une ségrégation inacceptable dans les BHP qui ont un affaissement très élevé.

Le problème de la perte d'affaissement peut toujours se produire, lors d'une livraison particulière. Quand on utilise des dosages élevés de superplastifiant ou un agent retardateur, on observe un certain retard dans le durcissement du béton [22].

On observe quelquefois un phénomène de ségrégation sévère quand, pour différentes raisons, une erreur se produit dans le dosage en superplastifiant ou le dosage en eau au moment de fabrication du BHP. La pâte de ciment devient alors beaucoup très fluide pour pouvoir maintenir les granulats en suspension. En général, il est assez difficile de récupérer un tel béton, sauf peut être si l'on a à sa disposition un agent colloïdal qui peut redonner au béton une certaine viscosité. Donc il est très important de mesurer de façon systématique les propriétés du béton frais juste après le malaxage, ce qui est une façon facile et rapide de se rendre compte quelque chose n'a pas « tourné rond » durant la fabrication du BHP.

Lorsque les propriétés du béton frais changent, il n'est pas toujours facile de déterminer si le problème provient des matériaux (changement dans leur teneur en eau, etc.) ou du malaxage proprement dit (formulation inadéquate, utilisation d'un mauvais ciment, utilisation de mauvais granulats ou utilisation d'une mauvaise séquence de malaxage), de l'équipement utilisé (blocage d'une trappe d'alimentation des balances) ou du système utilisé pour introduire les adjuvants. Comme le BHP moins « robustes » que le béton usuels, ils sont beaucoup plus sensibles aux variations de composition parce que les matériaux travaillent à la limite, ou presque, de leur capacité. Toute déviation par rapport aux caractéristiques que l'on a optimisées avec beaucoup de soin, et toute modification du malaxage, influencent fortement les propriétés des bétons à l'état frais et du béton durci [22].

II.4.2 Contrôle de la masse volumique:

La mesure de la masse volumique ne pose aucun problème. L'essai est simple et il peut être fait à la centrale ; il est un peu moins important de l'évaluer en chantier ou il est préférable de mesurer la teneur en air du béton dans le cas des BHP à air entraîné.

Il est bon de rappeler que la masse volumique d'un BHP frais est légèrement supérieure à celle d'un béton usuel fait avec les mêmes matériaux. La masse volumique d'un BHP sans air entraîné est souvent voisine de 2500 kg/m^3 et de 2400 kg/m^3 pour un BHP à air entraîné. Ce qui représente approximativement 50 à 100 kg/m^3 de plus que la masse volumique des bétons usuels [22].

II.4.3 Contrôle de l'affaissement:

II.4.3.1 Mesure:

Plusieurs facteurs affectent l'affaissement d'un BHP, mais, du point de vue rhéologique l'affaissement dépend essentiellement de facteurs liés au squelette granulaire. L'affaissement des BHP n'est pas facile à mesurer. Certains chercheurs ont récemment étudié le comportement rhéologique complexe de BHP selon une approche plus fondamentale. Cette approche scientifique et encore un peu lourde à mettre en œuvre, les a déjà conduits à des résultats intéressants, mais les techniques utilisées sont complexes.

Ces techniques peuvent être facilement utilisées en laboratoire, mais jusqu'à présent, elles n'ont pas conduit à la mise au point d'un essai suffisamment simple pour qu'elles puissent être utilisées sur le terrain pour remplacer l'essai d'affaissement.

Ces études rhéologiques sont basées sur la mesure de la résistance au cisaillement qu'il faut développer dans un béton frais pour le mettre en mouvement et sur la mesure de la viscosité du béton. Même si ces études n'ont pas encore un impact direct sur la mesure de l'affaissement en chantier, elles n'en ont pas moins beaucoup d'intérêt scientifique et pratique parce qu'elles fournissent un outil performant dans plusieurs domaines liés à la rhéologie. Il est très important d'étudier la rhéologie des pâtes de ciment, mais, en procédant à telles études, on ne tient pas compte de l'effet du gros granulats et du granulats fin. Ces nouvelles techniques de mesure sont aussi importantes pour étudier les problèmes de stabilité au pompage des BHP ainsi que pour régler des problèmes rencontrés quelquefois quand on utilise la technique des coffrages coulissants, problème qui sont très souvent dus à un mauvais contrôle de la rhéologie des BHP [22].

II.4.3.2 Facteurs influençant l'affaissement:

Plusieurs facteurs peuvent affecter la régularité de l'affaissement d'un BHP, mais du point de vue rhéologique, on peut les classer à deux grandes catégories : ceux reliés au squelette granulaire et ceux reliés au comportement rhéologique de la pâte de ciment. La quantité des granulats que l'on trouve dans le BHP, les proportions relatives du gros granulats et du granulats fin, leur courbe granulométrique respective et la forme des granulats sont les principaux facteurs qui affectent l'affaissement d'un béton.

Plus le rapport eau/liant ou le rapport eau / ciment est faible, plus la situation devient complexe, de telle sorte que des termes comme cohésif, collant, thixotropie sont parfois utilisés pour décrire la consistance de certains BHP.

II.4.4 Amélioration de La rhéologie du béton frais:

Bien que jusqu'à récemment on ait cherché à éviter d'entraîner de l'air dans les BHP qui n'avaient pas à faire face des problèmes de gel et dégel on peut facilement constater que, comme dans le cas des bétons usuels, une faible quantité d'air améliore de façon considérable la rhéologie des BHP à l'état frais. Evidemment, il en résulte une perte de résistance à cause de la présence de cet air entraîné.

Si l'on utilise des agents d'entraîneur d'air efficaces. On peut obtenir une grande quantité de petites bulles sans entraîner plus de 4 à 5 % d'air. Ce qui représente que 2 à 3 % de plus d'air que la quantité d'air piégé de toute façon dans n'importe quel BHP.

Il est incontestable que, non seulement ces petites bulles améliorent la résistance au gel-dégel des BHP, mais elle mais qu'elles améliorent aussi beaucoup la maniabilité du béton frais. Dans ce cas particulier, il a été possible de fabriquer un BHP ayant une résistance à la compression de 100 MPa à 91 jours qui avait une teneur en air 4.5 %. Récemment des chercheurs ont proposé d'utiliser des agents colloïdaux pour développer des BHP - autoplaçants qui pouvaient être placés très facilement dans des zone de ferrailage très dense c'est le but même de ce travail de recherche.

II.4.5. Perte d'affaissement

Plusieurs moyens pratiques permettent d'éliminer les problèmes de perte d'affaissement. En général, ces moyens consistent à utiliser des ajouts cimentaires pour remplacer une partie du ciment. L'utilisation des ajouts cimentaires permet d'améliorer la situation dans un grand nombre de cas de perte d'affaissement et cela explique leur utilisation régulière dans les BHP depuis le développement des bétons à haute résistance au début des années 1970.

II.4.6 Performances des BHP des propriétés exceptionnelles à l'état frais:

Les BHP présentent une fluidité, une ouvrabilité, une aptitude au pompage et un maintien de la plasticité dans le temps à l'état frais qui apportent de nombreux avantages lors de la mise en oeuvre:

- Un bon remplissage des moules et des coffrages et de l'enrobage parfait des armatures ;
- L'amélioration de l'écoulement du béton, en particulier dans les zones très ferraiées ;
- La réduction du délai d'exécution de l'ouvrage et gain de productivité ;
- L'exécution de bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles.

Le BHP présente aussi :

- Une bonne stabilité à l'état frais, ce qui garantit l'absence de ségrégation ;
- Une faible viscosité qui autorise le pompage sur de longues distances.

Obtenue avec pourtant un moindre dosage en eau, c'est la conséquence de la défloculation des grains de ciment et, lorsqu'on y a recours, de la présence d'ultrafines jouant aussi un rôle de lubrifiant entre éléments de plus grande taille [22].

II.4.7 Mise en œuvre

La composition et les propriétés des différents composants ne sont pas constantes, mais varient généralement dans une fourchette de tolérance. De petites divergences ou irrégularités lors du pesage, du mélange, du transport, du coulage et du compactage sont également inévitables. En fonction de l'ampleur de toutes ces différences et de leurs interactions, les propriétés du béton frais et durci varient plus ou moins autour d'une valeur moyenne.

Les principales variables sont la teneur en eau et la quantité de ciment. Le rapport eau-ciment réel différera de la valeur présumée et fluctuera dans une fourchette donnée, appelée intervalle de variation $\Delta E/C$.

Il existe également un lien entre le rapport eau - ciment et la résistance à la compression. Cette illustration montre également que, pour un $\Delta E/C$ donné, l'intervalle de variation correspondant à la résistance à la compression augmentera en fonction de la réduction du rapport eau ciment. En d'autres termes, les différences dans la teneur en eau et le dosage du ciment induisent une variation supérieure de la résistance en cas de rapport eau-ciment faible. Le BHP y est dès lors nettement plus sensible que le béton doté d'une résistance normale. Le pesage, le mélange, la mise en oeuvre, etc. doivent dès lors s'effectuer de manière extrêmement méticuleuse, dans des marges de tolérance les plus faibles possibles.

II.4.7.1. La Cure

La faible quantité d'eau présente dans le béton à hautes performances, en raison du faible rapport eau-ciment, doit demeurer dans le béton après sa mise en oeuvre lors du stade de la réaction avec le ciment. Les particules extrêmement fines qui comblent le squelette granulaire pour former un ensemble très compact et très dense empêchent la migration de l'eau du noyau vers la surface. L'eau à la surface peut s'évaporer, mais n'est pas renouvelée depuis le noyau.

Les capillaires de la zone superficielle se vident dès lors progressivement et sont soumis à des contraintes de contraction sans cesse accrues, qui induisent le retrait du béton en surface. La résistance à la traction encore minime du béton jeune ne peut pas absorber les contraintes apparues, ce qui induit l'apparition de fissures [22].

Le béton à haute résistance est donc plus sensible que le béton ordinaire au phénomène que nous appelons la fissuration plastique. La cure du béton fraîchement coulé est dès lors

indispensable, par exemple en humidifiant les surfaces non protégées, en apposant des produits de cure pour éviter l'évaporation.

II.5 PROPRIETES DU BETON DURCI

II.5.1. Propriétés physico-chimiques et mécaniques des BHP

II.5.1.1. Effets de la température sur le béton en cours de durcissement

En raison de la teneur élevée en ciment et de l'utilisation de ciment fin (classe 52,5), la production de chaleur, inhérente au processus de l'hydratation, s'intensifie dans le béton à hautes performances par rapport au béton ordinaire. Ce phénomène peut dès lors induire, même dans des éléments qui ne pourraient pas être spontanément qualifiés de 'massifs', des contraintes thermiques relativement élevées.

Même si le béton à haute résistance absorbe mieux les contraintes de traction, le risque de fissuration est cependant nettement supérieur. Lors de la conception et de l'exécution, il convient donc d'accorder à ce phénomène une attention suffisante. Des mesures destinées à exclure au maximum le retrait empêché s'imposent dès lors. Les calculs des contraintes en fonction du développement calorifique escompté et des propriétés du béton en phase de durcissement sont souhaitables.

II.5.1.2 Comportement en compression

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et le granulat se propageront autour des granulats. A un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérence se propageront à toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton cèdera sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage.

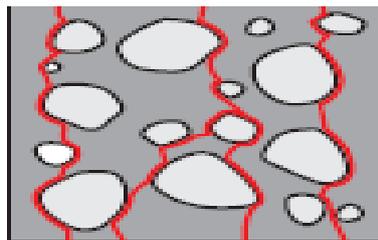


Figure II.6 Bétons ordinaire: fissures d'adhérence et fissures dans le mortier

Le BHP se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la résistance des granulats. Dès lors, l'apparition et le développement de fissures d'adhérence ou de microfissures seront retardés. A l'approche de la rupture, les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats.

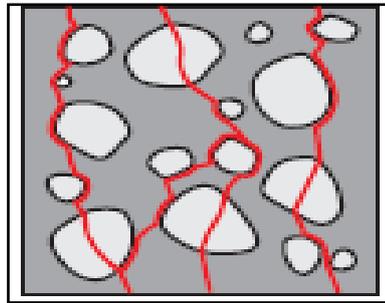


Figure II.7 Béton à haute performance: les granulats sont également fissurés.

Sur le diagramme contrainte-déformation (figure II.8), ce phénomène s'exprime par un comportement légèrement plus linéaire par rapport au béton de résistance conventionnelle. De même, le béton à hautes performances présente un retrait plus marqué après l'obtention de la résistance à la compression, c'est-à-dire après la rupture du béton, et la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro. Le BHP présente en d'autres termes un comportement de rupture fragile plus marqué que le béton de résistance conventionnelle.

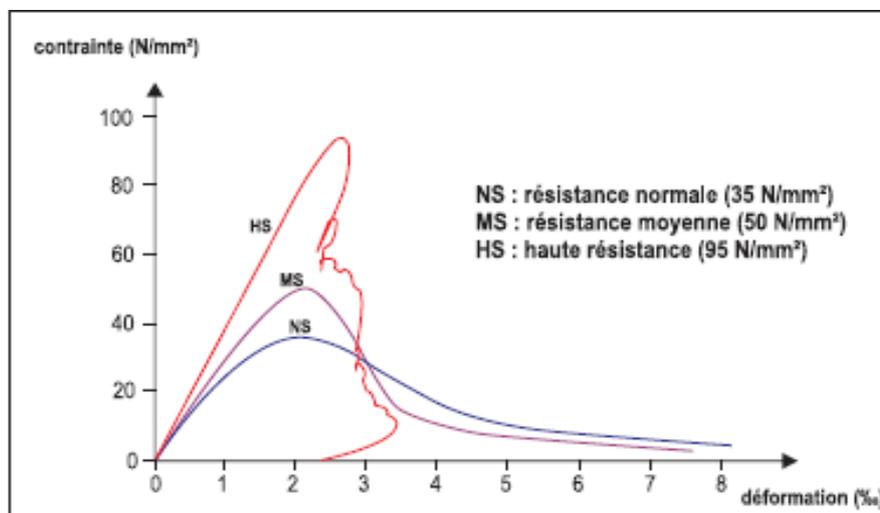


Figure II.8 Diagramme contraintes – déformations

II.5.1.3 Comportement en traction

Généralement, la résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression. En ce qui concerne le béton conventionnel, différentes formules sont appliquées.

Dans la norme EN 1992-1-1:2004, une formule différente est proposée pour le béton à haute résistance par rapport au béton conventionnel. Un élément essentiel est cependant le caractère fragile du béton à hautes performances, signalé ci-dessus. Dès que la résistance est atteinte, la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro.

II.5.1.4 Module d'élasticité

Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.

II.5.1.5 Rigidité

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à hautes performances est toujours lié à la résistance à la compression et supérieur à celui des bétons traditionnels.

II.5.1.6. Retrait

Tant le béton à haute résistance que le béton ordinaire sont soumis à un retrait plastique à un retrait endogène (par auto-dessiccation) et à un retrait de dessiccation.

a/Retrait endogène

Le ciment réagit avec une quantité d'eau donnée. Ce processus s'accompagne d'une réduction du volume. Par rapport au volume initialement occupé par l'eau et par le ciment, le volume du produit de la réaction après hydratation complète sera réduit d'environ 10 %. Au début de la réaction, le béton encore plastique absorbe sans difficulté la réduction volumique. Dès que le béton se rigidifie, la contraction est empêchée. Ce phénomène entraîne le développement de contraintes de traction dans les espaces remplis d'eau. Ces pores en devenir se dilatent, ce qui provoque une sous-pression aspirant l'air extérieur. Dans cet espace désormais partiellement rempli d'eau, apparaissent des forces capillaires qui contractent les pores. Ce retrait interne est donc le résultat de deux processus: un processus chimique et un processus physique.

Dans un béton ordinaire, caractérisé par un excédent d'eau, le retrait endogène demeure limité à environ 100×10^{-6} . En ce qui concerne le béton à haute résistance, où la quantité d'eau disponible est nettement moins importante, le ciment attire à lui cette faible quantité d'eau. Les pores s'asséchant progressivement sont soumis à des forces capillaires en augmentation constante, permettant de la sorte au retrait endogène d'atteindre des valeurs clairement supérieures.

Il est manifeste que le retrait endogène augmente avec l'accroissement de la résistance et s'effectue essentiellement à court terme. Etant donné que le retrait endogène résulte du processus d'hydratation, il sera toujours présent, même en cas de cure parfaite du béton. Seuls de nouveaux concepts relatifs à la cure intérieure pourraient s'avérer précieux; ils sortent cependant du cadre du présent bulletin. De toute évidence, le retrait endogène du béton à hautes performances requiert la nécessaire attention. Conjugué aux éventuelles contraintes thermiques résultant de la chaleur d'hydratation élevée, le retrait endogène pourrait en effet provoquer l'apparition d'importantes fissures dans un BHP frais.

b/Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation se produit dans un environnement qui n'est pas saturé en eau. Dans ce cas, de l'eau peut s'évaporer des pores. Ce phénomène donne lieu à des forces capillaires qui contractent les pores et génère par voie de conséquence une réduction du volume. Le niveau du retrait de dessiccation dépend en grande partie de la quantité d'eau évaporable présente dans le béton. Dans des circonstances normales, une fraction importante ne s'évaporerait pas, car elle est liée chimiquement ou est fixée entre les produits d'hydratation. L'eau présente dans les pores capillaires, de plus grandes dimensions, peut quant à elle s'évaporer. Le volume réduit des pores capillaires est une caractéristique typique du béton à haute résistance.

Il en ressort que le retrait de dessiccation diminue en cas d'augmentation de la résistance. Le retrait d'un béton de 90 MPa dans un environnement affichant une humidité relative de 50 % est de moitié inférieur au retrait observé pour un béton de 30 MPa. La diminution du retrait se poursuit avec l'accroissement de l'humidité relative. L'addition de fumées de silice n'a aucune incidence sur le retrait final, mais accélère le processus. Le retrait de dessiccation peut toujours se poursuivre, même à plus long terme. L'ampleur de ce retrait peut être sensiblement influencée par des mesures de cure énergiques.

II.5.1.7 Le Fluage

Le fluage du béton à hautes performances – c’est-à-dire la déformation croissante sous l’effet d’une contrainte constante – est fréquemment inférieur au fluage observé pour un béton de résistance conventionnelle. L’âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par fluage sera plus importante que dans le cas d’un béton plus âgé. Il en va de même en ce qui concerne le béton conventionnel.

La norme EN 1992-1-1:2004 définit les formules nécessaires au calcul du fluage; le tableau 3 mentionne quelques résultats. Il en ressort par exemple que le coefficient de fluage d’un béton de classe de résistance C 25/30 est environ trois fois supérieur à un béton de classe de résistance C 90/115 pour une humidité relative de 50 %. Il convient cependant de conserver à l’esprit que les contraintes observées dans le BHP sont nettement supérieures à celles inhérentes au béton conventionnel. Les déformations immédiates peuvent dès lors devenir aussi importantes – en fonction, bien évidemment, de la résistance à la flexion, dans le cas d’une poutre par exemple. Il va sans dire que ce phénomène est encore renforcé à long terme par le biais de l’utilisation d’un coefficient de retrait. En cas de constructions en BHP, la limitation des déformations et des flèches peut devenir le facteur déterminant du projet, plutôt que la portance proprement dite. Ce faisant, le matériau ne peut pas toujours être utilisé de manière optimale.

Nota

Dans les règles BAEL, le coefficient de fluage à prendre en compte est fonction de la présence de fumées de silice. Il est égal à :

- 0,8 pour les BHP avec fumée de silice.
- 1,5 pour les BHP sans fumée de silice.

Ce coefficient de fluage est égal à 2 pour les bétons traditionnels.

Dans les structures précontraintes, l’utilisation de BHP permet de réduire les pertes de précontrainte associées aux déformations différées du béton. Ce faible fluage permet d’augmenter l’efficacité de la précontrainte et de faciliter le contrôle géométrique des ouvrages.

L’utilisation de BHP avec fumée de silice conduit donc à des réductions de déformations différées et des redistributions d’efforts plus faibles.

II.5.1.8. Perméabilité

Leur faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité.

II.5.1.9. Durabilité

Etant donné la structure plus dense des pores du béton de hautes performances, ce matériau affiche un meilleur comportement face aux mécanismes d'agression. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par l'entrée de substances agressives, telles que des chlorures, du dioxyde de carbone, des acides, ... Si la pénétration de ces substances dans le béton est entravée, comme dans le cas du BHP, les processus de dégradation y afférant ne pourront bien évidemment se produire que bien plus tard. Quoi qu'il en soit, il convient toujours de veiller à la pureté des éléments constitutifs du béton, afin d'éviter toute agression par des mécanismes internes (présence de sulfates, d'alcalis, de granulats réactifs, ...).

Toutefois, la durée d'utilisation d'une construction est en grande partie également déterminée par les conditions d'exécution. Dans ce cadre, nous avons déjà fait allusion ci-dessus au risque de fissuration prématurée résultant des effets thermiques et du retrait (principalement endogène). La présence de telles fissures peut influencer sensiblement la durabilité de la construction.

II.5.1.10 Résistance aux agents agressifs

La faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs en phase gazeuse ou liquide (eaux de mer, eaux sulfatées, solutions acides, dioxyde de carbone, etc.).

II.5.1.11 Migration des ions chlorure

Le Projet national BHP 2000 a clairement démontré que la résistance des BHP à la migration des ions chlorures est largement supérieure à celle des bétons courants, grâce à sa microstructure plus dense. C'est un des points forts du BHP vis-à-vis du risque de corrosion des armatures.

II.5.1.12 Tenue aux attaques gel/dégel

Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel grâce à leur forte compacité et à leur résistance mécanique élevée.

La faible perméabilité des BHP et le faible rapport E/C favorisent une résistance plus importante aux risques d'écaillage. Il est possible de formuler des BHP qui résistent bien aux cycles gel/dégel et à l'écaillage sans ajouts d'entraîneur d'air. Lorsque le béton doit résister à un gel sévère (forte saturation d'eau), l'utilisation d'un entraîneur d'air est généralement nécessaire si le E/C est supérieur à 0,32.

La tenue du béton durci aux effets du gel/dégel est validée par trois essais de performance :

- Essai de gel dans l'eau – dégel dans l'air (norme NF P 18-425 pour les environnements de gel sévère et des bétons à saturation modérée.
- Essai de gel dans l'eau – dégel dans l'eau (norme NF P 18-424) pour les environnements de gel sévère et des bétons à saturation en eau élevée.
- Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence de sels de déverglaçage (norme NF P 18-420).

Les deux premiers essais permettent de justifier la résistance au gel interne, le troisième, la résistance à la dégradation de surface (écaillage).

II.5.1.13 Résistance au feu

Même si la durabilité du BHP est en règle générale nettement supérieure à celle du béton conventionnel, la résistance au feu est cependant un élément sur lequel il convient d'attirer l'attention. En raison de la structure très dense des pores, la pression de vapeur, qui apparaît à l'intérieur du béton à des températures excédant 100 °C, peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur, en raison de la structure très dense du matériau. Par rapport au béton conventionnel, la résistance du béton à haute résistance diminuera dès lors plus rapidement si la température est supérieure à 100 °C. En raison des pressions de vapeur accumulées, il convient également d'examiner les risques potentiels d'éclatement du béton. En ce qui concerne le béton des classes de résistance C 55/67 à C 80/95, les règles inhérentes au béton conventionnel suffisent pour éviter les éclatements, pour autant que la teneur en fumées de silice soit inférieure à 6 % de la masse de ciment.

En cas de teneurs supérieures en fumées de silice et en cas de classe de résistance C 90/105, il sera nécessaire de prendre des mesures particulières, telles que le mélange d'au moins 2 kg/m³ de fibres de polypropylène. En cas de températures élevées, ces fibres fondront, ce qui laissera de petits canaux ouverts via lesquels les pressions de vapeur pourront être dissipées plus rapidement.

I I.5.1.14 Carbonatation

De nombreuses études ont démontré que la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation est très nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel. En effet, le réseau poreux, peu connecté limite la diffusion du gaz carbonique au sein de la matrice cimentaire. La faible porosité initiale favorise le colmatage des pores lié à la formation des cristaux de calcite. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures.

II.5.1.15 Adhérence Acier-Béton

La grande résistance mécanique du BHP et sa microstructure interne permettent de mobiliser une liaison supérieure entre les armatures en acier et le BHP et donc d'améliorer les qualités d'adhérence, ce qui permet une réduction des longueurs d'ancrage et de scellement.

II.5.1.16 Réduction des flèches et des déformations des structures :

Plusieurs propriétés, de nature soit rhéologique, soit mécanique, permettent de réduire les flèches et les déformations dans les structures et les dalles en BHP: résistance à la traction du béton plus grande, module d'élasticité plus élevé, fluage plus faible et adhérence acier-béton supérieure.

II.5.1.17. Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des BHP, telles que conductivité, diffusité, chaleur spécifique et coefficient de dilatation ne diffèrent pas sensiblement de celles des bétons traditionnels.

B- LES BETONS AUTOPLAÇANTS

II.1 INTRODUCTION

Les bétons Autoplaçant (ou BAP) se distinguent des bétons ordinaires (BO) ou vibrés, principalement par leurs propriétés rhéologiques à l'état frais. En effet, ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quelque soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement sans aucun risque de ségrégation.

Pour parvenir à ce cahier de charge, les BAP sont formulés différemment des BO. En général, ils possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO ainsi qu'un volume de sable assez

proche. L'apport de la pâte (ciment+eau+adition) est privilégié au détriment des gravillons comme le montre la figure II.9.

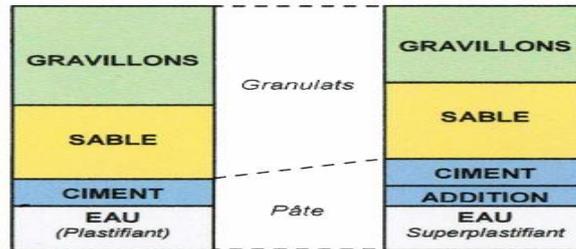


Figure II.9 : Diagramme contraintes – déformations

La pâte a pour rôle de limiter les contacts entre les différents gravillons et d'empêcher la formation de voûtes susceptible de bloquer l'écoulement (figure II.10).

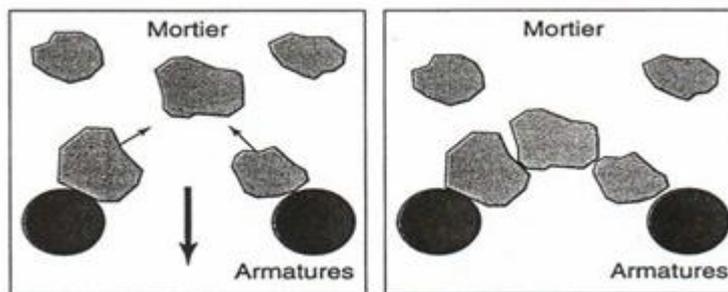


Figure II.10 : Phénomène de blocage d'un granulat au droit d'un obstacle

Le volume important d'éléments fins permet aussi d'établir un compromis entre la stabilité et la maniabilité du BAP. Ce compromis n'est pas suffisant pour garantir la fluidité, il est donc nécessaire de recourir à un superplastifiant réducteur d'eau à fort pouvoir défloculant pour minimiser la demande en eau et pour disperser au mieux les particules. Parfois l'ajout du Superplastifiant entraîne la ségrégation du béton, ce qui nécessite l'utilisation d'un agent colloïdal ou de viscosité, qui a pour rôle d'assurer une meilleure stabilité. Son utilisation est souvent restreinte pour des raisons de coût.

II.2- Historique des BAP

Le premier prototype d'un tel béton fut développé en 1988 par le professeur OKAMURA de l'université de Kochi au Japon. Sa première utilisation pratique intervient deux années plus tard pour la construction d'un pont. Cette découverte en matière technologique du béton suscita un énorme intérêt au niveau mondial. A la fin des années 90 on vit apparaître les premières applications en Suède, en France, aux Pays bas et en Suisse. Depuis son utilisation ne cesse de croître.

II.2.1-Définition des BAP

Par définition, un béton auto-plaçant est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

Cette nouvelle famille de bétons a été développée afin d'obtenir un matériau se mettant en œuvre sans faire appel à la vibration, ce qui présente de nombreux avantages sur les chantiers, tant au niveau de la diminution des nuisances sonores que de l'amélioration des conditions de travail du personnel de chantier. Les BAP sont particulièrement adaptés pour les ouvrages de grande hauteur ou de formes complexes et pour les structures très ferrillées. Ces bétons permettent d'obtenir des gains de productivité considérables sur chantier et, bien évidemment, offrent de très bons résultats en matière de qualité esthétique des parements. Les BAP sont :

- Très fluides ,
- Absolument homogènes,
- Mis en œuvre sans vibration,
- Ils présentent des résistances et des durabilités analogues à celles des bétons traditionnels ou à celles des Bétons à Hautes Performances mis en œuvre par vibration. Pour être utilisés en structure, ils doivent être conformes à la norme NFEN 206-1.

II.3- Principaux essais de caractérisation et contrôle de la rhéologie des BAP

Afin de traiter des différentes caractéristiques et des moyens de les contrôler pour les bétons Auto-plaçant, nous passerons en revue les propriétés essentielles recherchées ainsi que les différents paramètres qui les contrôlent.

II.3.1. Les propriétés essentielles recherchées :

La rhéologie du béton frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de béton lui même, un des avantages des bétons autoplaçants sera d'améliorer la maniabilité du mélange qui peut être évaluée par la mesure du diamètre d'étalement du béton, afin qu'il puisse remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration (l'étalement du béton et sa mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité).

- La compacité du béton est une propriété recherchée pour avoir une matrice homogène, afin de favoriser l'amélioration des qualités mécaniques et de la durabilité du béton durci. Les chercheurs visent aussi à aboutir à la stabilité des bétons Autoplaçant, en proposant différentes solutions (utilisation des agents colloïdaux et des super plastifiants), car en général le critère de fluidité-stabilité est assez difficile à assurer.

Par stabilité on entend ; la résistance à la ségrégation, à la sédimentation et au ressuage. Aussi, lors de leur mise en place les BAP ne doivent pas présenter des phénomènes de blocage (encombrement des granulats aux alentours des zones ferraillées).

Un BAP est donc, un béton qui est capable de remplir les coffrages les plus complexes (de part leurs formes) et les plus ferraillés (densité d'armatures considérable) sans avoir recours à d'autres moyens de mise en place que l'effet du poids propre du béton même. Ce béton ne doit en aucun cas présenter de ségrégation ni de blocage de l'écoulement. Les propriétés essentielles des BAP frais sont :

Tableau II.1. : Propriétés essentielles des BAP à l'état frais

<p>Pour Une Excellente Déformabilité</p>	<p>1. L'augmentation de la fluidité de la pâte :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par l'utilisation de super plastifiant haut réducteur d'eau, b. Par l'adoption d'un rapport Eau/Liant optimal. <p>2. La réduction des frictions inter granulaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. En diminuant le volume des gros granulats (un volume de pâte élevé). b. En utilisant un liant de granularité continue.
<p>Pour Une Bonne Stabilité</p>	<p>1. La réduction des séparations des particules solides :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par la limitation de la teneur en granulats. b. Par la réduction du diamètre maximal des granulats. c. Par l'augmentation de la cohésion et de la viscosité : <ul style="list-style-type: none"> - un petit rapport Eau/liant - l'utilisation d'agent colloïdal (agent de viscosité) <p>2. La minimisation du ressuage :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. En adoptant un petit dosage en eau, b. En adoptant un petit rapport Eau/Liant, c. En utilisant des fines à grande surface spécifique, d. En augmentant le dosage en agent de viscosité.
<p>Pour Un moindre Risque de Blocage</p>	<p>1. Accroître la cohésion pour réduire la ségrégation des granulats :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par l'adoption d'un petit rapport Eau/Liant, b. Par l'utilisation d'agent colloïdal, <p>2. Respecter une compatibilité entre l'espacement des armatures et les granulats (volume et diamètre maximal) :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par l'utilisation d'un petit volume de granulats, b. En choisissant un petit diamètre maximal des granulats.

II.3.2 Essais de caractérisation des BAP :

Pour évaluer la fluidité, plusieurs essais normalisés et non normalisés sont recommandés. Ces essais ne mettant pas en relief l'importance du caractère homogène du béton, il est donc avéré de développer une autre famille d'essais ; les tests de facilité et capacité de remplissage.

La facilité ou capacité de remplissage est définie comme l'aptitude du béton à rester homogène et remplir entièrement tous les coins du coffrage sans aucune vibration (Shindoh 1990).

En ce qui concerne l'aptitude au remplissage, les travaux sur les BAP utilisent des tests non normalisés.

Les essais visant à évaluer la capacité de remplissage ont généralement comme principe d'évaluer l'habileté du béton à passer à travers une série de barres d'armatures en mesurant la quantité de béton ayant franchi ces obstacles.

Les méthodes de mesure de la ségrégation se présentent en deux groupes : le premier comprend les méthodes de mesure sur béton frais, alors que le second concerne les méthodes de mesure sur béton durci. Jusqu'à présent, aucune méthode ne fait l'unanimité.

Trois principaux essais permettent de caractériser la rhéologie des BAP :

a- Essai d'étalement (Slump-Flow)

Pour la détermination de l'étalement on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (800 x supérieur à 800 mm), puis il est rempli de béton . Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm (figure.II.11). La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. L'important est de procéder toujours de la même manière. Lorsque la petite ouverture se trouve en bas, le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché. Dans ce cas il en résulte une valeur d'étalement plus élevée de 20 à 40mm, par rapport à celle obtenue avec le cône disposé en sens contraire pour le même béton.

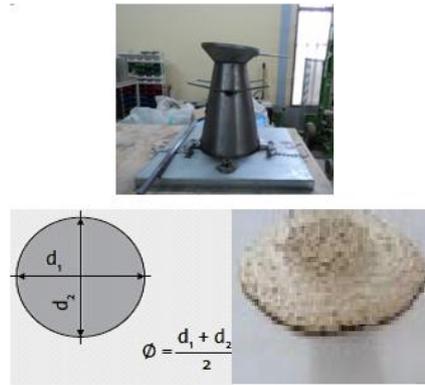


Figure II.11 : Détermination de l'étalement d'un BAP au cône

Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies:

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650mm,
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750mm,
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850mm.

b- Essai de boîte en L (L-Box)

La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante: la partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de 3 barres d'armatures ($\Phi 16\text{mm}$) distantes de 50mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte.

On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (h_1 et h_2), afin de qualifier sa capacité d'auto nivellement. Le rapport (h_2/h_1) devrait être supérieur 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini (figure II.12).

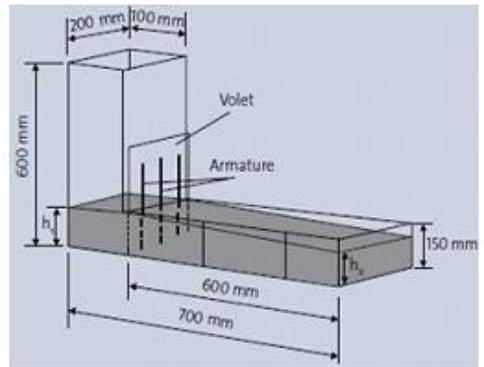


Figure II.12 : Représentations schématisées et photographiques de l'essai de boîte en L

c- Essais de stabilité au tamis

Cet essai consiste à déverser une quantité de béton (environ 5 kg) sur un tamis (de maille 5mm) avec une hauteur de chute de 50cm (voir figure II.13). Puis au bout de 2min, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- $0\% < P_{\text{LAITANCE}} < 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < P_{\text{LAITANCE}} < 30\%$: stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),
- $P_{\text{LAITANCE}} > 30\%$: stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).



Figure II.13 : Représentation de l'essai de stabilité au tamis

d- Essai d'entonnoir (V-Funnel)

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies sur la figure suivante est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto plaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé (figure. II.14).

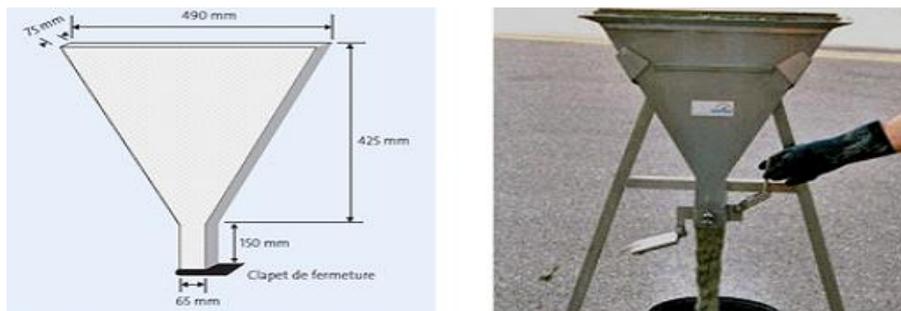


Figure. II.14 : Essai d'entonnoir utilisé pour mesurer le temps d'écoulement du béton

Les temps d'écoulement au V-Funnel dépendent également du type d'application, mais ne sont groupés que selon 2 classes:

- Classe VF1 : temps d'écoulement inférieur à 10s,
- Classe VF2 : temps d'écoulement compris entre 7 et 27s.

II.4- Avantages attendus liés à la fluidité des BAP

Plusieurs avantages liés à la fluidité des BAP peuvent être attendus, citons notamment :

- réduction de la durée et du coût de la mise en œuvre,
- réduction du bruit et de la pénibilité lors du coulage,
- augmentation de la sécurité,
- augmentation de la durabilité,
- amélioration de la finition des parements.

II.5. Mise en œuvre des BAP

On peut résumer à trois les modes de mise en place des bétons autoplaçants dans des coffrages.

1. Le premier consiste à déverser le béton par le haut du coffrage. Cette technique traditionnelle, commune aux bétons courants, a plusieurs inconvénients : Tout d'abord, elle augmente les phénomènes de ségrégation du béton dus à sa chute dans les coffrages [3]. Ensuite, elle favorise la présence de bulles et de taches sur le parement et accentue le lessivage de l'agent de décoffrage utilisé. Il convient donc de réduire le plus possible la hauteur de chute pour améliorer la qualité d'aspect des parements.
2. Le deuxième se fait par l'intermédiaire d'un tube plongeur introduit depuis le haut du coffrage. Cette méthode a pour avantage de limiter les effets de la chute du béton frais dans les coffrages et est utilisée pour les éléments verticaux de grande hauteur (poteaux, voiles, etc.....).
3. Le troisième correspond à l'injection du béton par le bas de la banche à l'aide d'une pompe. Ce procédé évite la chute du béton, diminue la présence de bulles sur le parement et favorise l'auto-nivellement, mais nécessite une adaptation des banquettes et la présence d'une pompe. Cependant et quelle que soit la méthode de mise en œuvre choisie parmi ces trois, la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages doit être réduite pour éviter la ségrégation dynamique du béton [3]. Il est ainsi recommandé de limiter cette longueur à un maximum de 10 m.

Quant à la pression exercée par les BAP sur les coffrages, les données de la littérature en 2001 semblaient se contredire. Dans un souci de sécurité, la poussée du béton frais en pied de coffrage était prise égale à la pression hydrostatique [4].

Depuis, les mesures réalisées sur le site indiquent que la vitesse de remplissage du coffrage constitue un paramètre majeur dans l'intensité de la poussée sur les coffrages : une vitesse rapide amène à une poussée hydrostatique [4,5].

D'autre part, des précautions de mise en œuvre des BAP concernent l'étanchéité des coffrages dont il faut colmater les ouvertures vis-à-vis des pertes éventuelles de laitance (précautions identiques à celles pratiquées pour les bétons fluides classiques).

Enfin, les cures post-bétonnage des BAP sont essentielles pour limiter l'évaporation, étant donné la sensibilité de ces derniers au retrait plastique due à leur faible ressuage.



Figure II.15: Mise en place aisée de BAP par un seul ouvrier : au moyen d'une benne dans le cas d'une dalle ou d'une benne munie d'un tube dans le cas d'un mur.



Figure II.16 : Coulage Autoplaçant (béton précontraint)

II.6- Domaine d'emploi

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 (figure II.16).

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.



Figure II.17: *Eléments préfabriqués en BAP à haute résistance*

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 [6] 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. 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. L'expérience acquise aux Pays-Bas a permis d'étendre la classification en fonction des différences existant entre les BAP et de déterminer différents domaines d'emploi, selon leurs propriétés, comme le montre la (figure II.18).

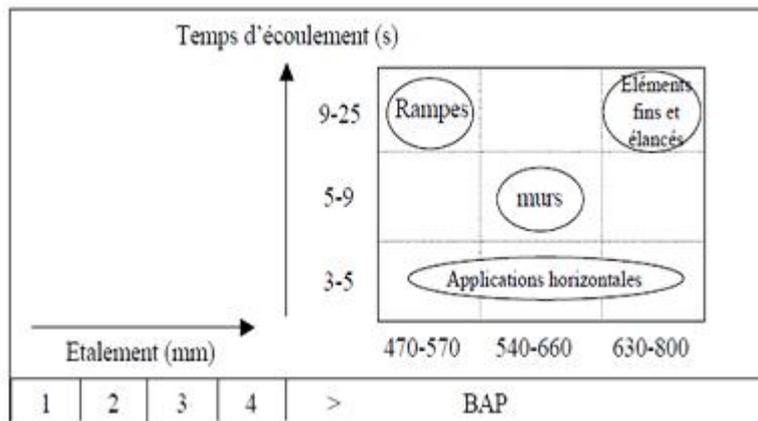


Figure II.18: Domaine de classification des bétons étendus au BAP [6].

Les mesures d'étalement et de temps de d'écoulement sont respectivement réalisées au cône d'Abrams et au V-funnel.

Le classement s'effectue selon leur intervalle d'écoulement "I" (tenant compte de la géométrie du coffrage et de la disposition des armatures), le type d'application, et l'épaisseur de la structure dans le cas d'une application horizontale [7].

Tableau II.2 : Classification des BAP selon leur application [7]

Intervalle d'écoulement (mm)	Application horizontale		Application verticale
	Epaisseur ≤ 300 mm	Epaisseur > 300 mm	
$I \geq 100$	1	2	2
$80 \leq I \leq 100$	2	2	3
$I < 80$	3	3	3

Les classes 2 et 3 contiennent deux sous-classes en fonction de la longueur maximale de cheminement horizontal du BAP : 5m pour les classes 2a et 3a, 10m pour les classes 2b et 3b. 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 [8].

En termes de résistances mécaniques, des BAP «ordinaires» aussi bien que des BAP «Hautes Performances» peuvent être mis au point [9]. Bien que leur formulation et leur contrôle, lors de la mise en œuvre, nécessitent une attention particulière, différents exemples ont mis en évidence les possibilités techniques qu'ils offrent. Outre le fait qu'ils couvrent la gamme des propriétés mécaniques usuelles, les qualités esthétiques des parements obtenus devraient rapidement séduire les maîtres d'ouvrage. Les caractéristiques techniques des BAP ont par ailleurs une implication directe du point de vue économique mais aussi social.

II.7- FORMULATION DES BAP

II.7.1 Formulations des BAP existants dans la bibliographie

Plusieurs méthodes de formulations des bétons autoplaçants existent aujourd'hui dont un grand nombre a été publié dans les différents congrès dédiés aux BAP. La méthode Japonaise développée par Okamura [33] et Ozawa est l'une des premières méthodes mises au point pour la formulation des bétons autoplaçants à étalement d'au moins 65cm. La méthode préconise l'augmentation du volume de pâte au détriment du volume de granulats.

Ce principe vise à éviter tout problème de blocage des gravillons en imposant un volume de gravillons inférieur à 50% au volume solide du béton et un volume de sable de diamètre

supérieur à 90 μ m est égal à 40% du volume total du mortier du béton. Au final, la méthode conduit à des volumes de pâte très élevés, une surestimation du liant et donc à des bétons très onéreux.

La méthode proposée préconise en premier lieu d'étudier le volume de pâte. Ils considèrent un volume de pâte égal à la porosité du squelette granulaire du béton augmenté d'une valeur qui conduira à une bonne lubrification du squelette en évitant les risques de blocage. Ils supposent que la pâte pénètre tous les vides inter-granulaires du squelette empilés d'une façon lâche sans aucune surpression extérieure. Ce volume est à priori de l'ordre de 42 à 48% du volume total de l'échantillon. D'autres méthodes ont été proposées comme celle développée au CTG (Centre Technique Groupe, Italcementi) qui repose sur le développement d'un fuseau granulaire propre aux BAP à étalement compris entre 55 et 75cm. Cependant, en dépit de leur multitude et de leurs avantages respectifs, les méthodes de formulations des BAP nécessitent un programme expérimental assez conséquent pour fixer la nature et les proportions des composants de la pâte qui assurera la consistance nécessaire pour limiter la ségrégation et assurer une bonne fluidité.

L'AFGC (Association Française de Génie Civil) a mis en place des techniques pour la caractérisation des BAP à l'état frais qui sont appliquées dans la profession du BTP [3]. Il reste que, pour l'instant, il n'existe pas pour les BAP de méthode de formulation généralisée, comme peut l'être la méthode de Dreux-Gorisse pour les bétons ordinaires .

II.7.2 Cahier de charge minimum à l'état frais

Plusieurs spécificités de composition des BAP découlent de ces diverses approches.

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants.
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement (figure I.18). Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée.

- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.
- De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

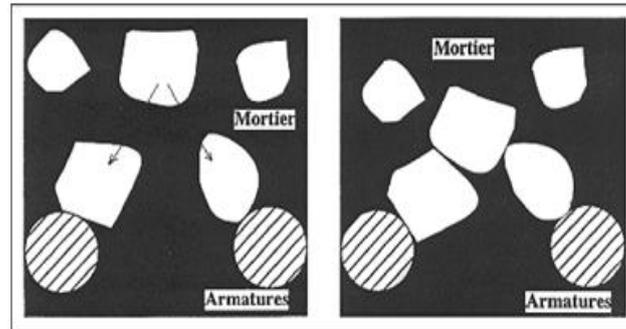


Figure II.19 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [32]

En résumé, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton.

II.7.3 Particularité de la composition des BAP

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

Un volume de pâte élevé :

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400l/m³).

Une quantité de fines ($\text{Ø} < 80\mu\text{m}$) importante :

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500kg/m³) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voir trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes. Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité et les paramètres

d'ouvrabilité qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc..., et leur proportion respective. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton (figure II.20) [10].

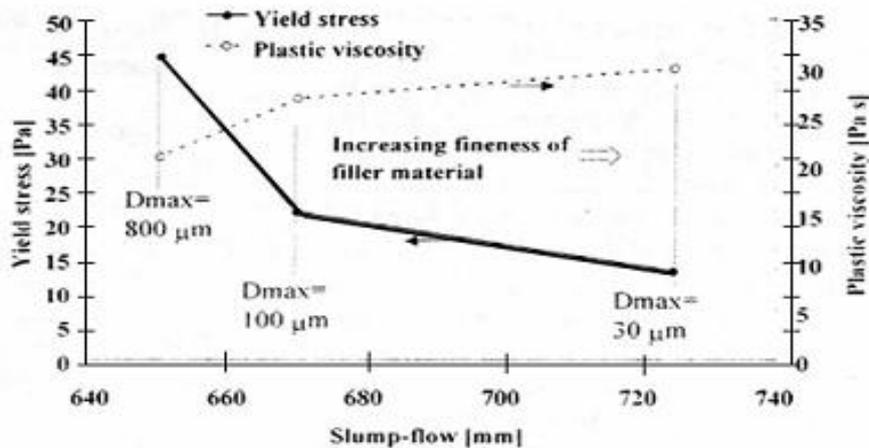


Figure II.20 : Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [10]

L'emploi de super plastifiants :

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des supers plastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Les super plastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [11].

L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau):

L'ajout d'un Superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (figure II.21). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les

risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

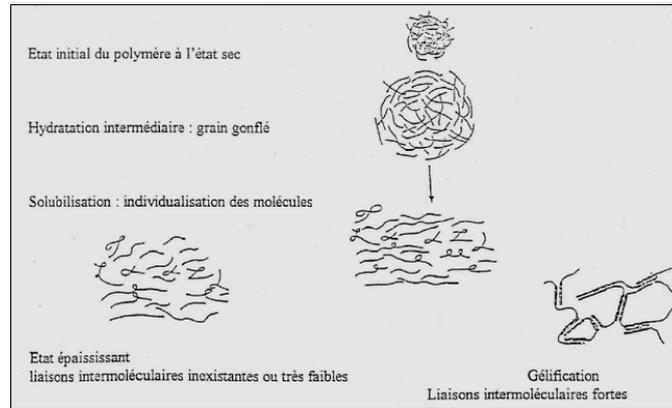


Figure II.21 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides (d'après[30])

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité-superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (figure I.22).

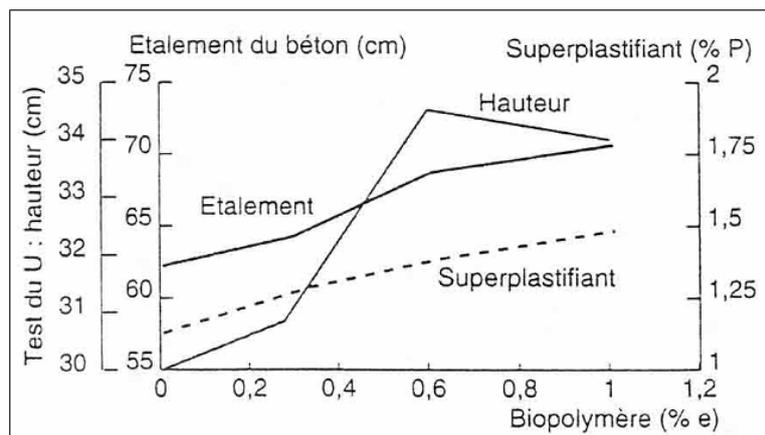


Figure II.22: Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant d'après[31]

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines < 0,3). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas. Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des

problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [12].

Un faible volume de gravillon :

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée. Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée. Le diamètre maximal des gravillons (D_{MAX}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec D_{MAX} , cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes (figure II.23). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les super plastifiants) sont nécessaires.

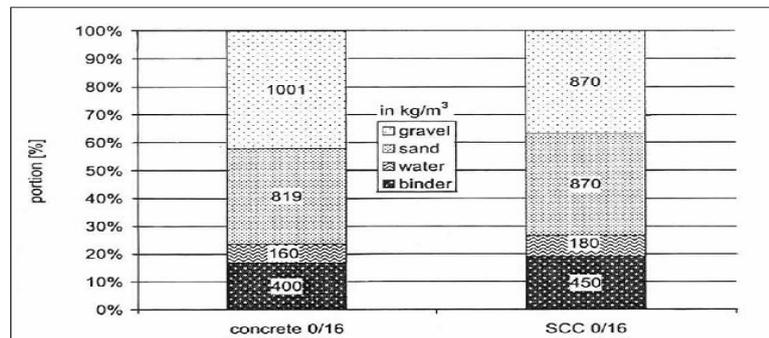


Figure. II.23 : Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré d'après [13]

II.8 – PROPRIETES DES BAP A L'ETAT DURCIS

Les particularités de composition des bétons auto-plaçant 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.

II.8.1. Propriétés mécaniques

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition [14]. Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie et les granulats. Les propriétés de ce mélange (module, retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait.

II.8.1.1 Résistance mécanique

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [15,16]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les super plastifiants, 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 [17,18] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes (voir figure II.24).

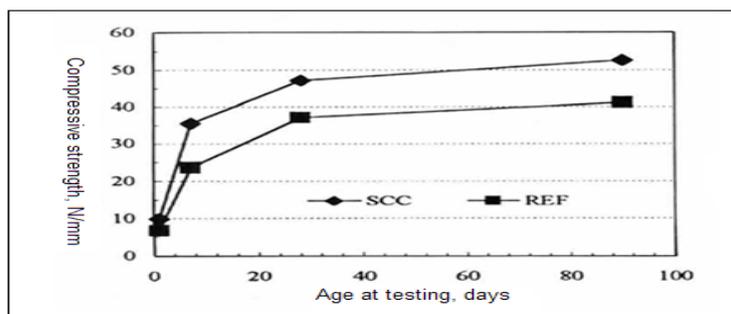


Figure II.24: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV [17]

De plus, certains auteurs [19] 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. Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours (figure II.25).

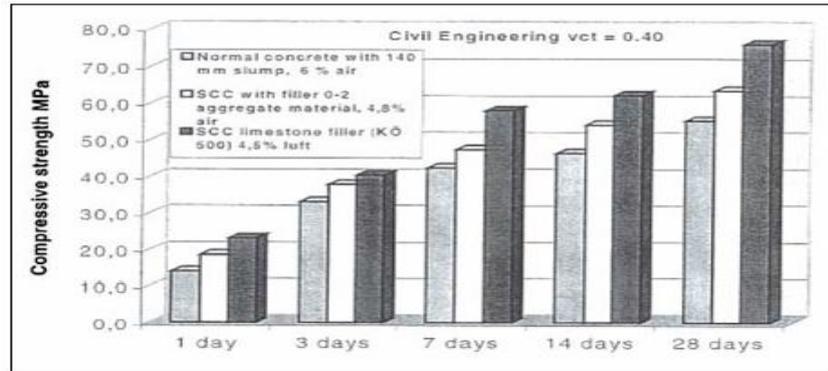


Figure II.25: Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP [32]

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [20]. De même, certains super plastifiants 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 [21]. 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.

II.8.1.2. Retrait (état frais, état durci)

Entre la fabrication et le début de prise, le béton ne présente pas de cohésion et se trouve en phase dite plastique. Pendant cette période, le béton subit une contraction de volume appelée premier retrait ou retrait plastique. Celui-ci est le résultat de plusieurs phénomènes chimiques ou physiques qui ont lieu dans un matériau en perpétuelle évolution.

La prise constitue la transition entre le moment où le béton ne présente pas de cohésion et celui où il commence à devenir résistant. Avant la prise, les déformations libres du béton sont dues à la gravité, aux réactions d'hydratation et aux échanges thermiques avec le milieu extérieur. Juste après le coulage, le béton est un mélange de particules solides, d'eau et d'air en suspension. Etant donné les différences de masse volumique, les grains de ciment et les granulats ont tendance à ségréger et contraignent l'eau et les bulles d'air à percoler vers la surface. Ce phénomène, appelé ressuage, engendre une couche d'eau superficielle et un tassement de la matrice cimentaire. Pendant cette période, dite dormante, la réaction d'hydratation commence et un premier dégagement de chaleur apparaît dès la mise en contact du ciment et de l'eau. Des hydrates sont produits depuis la périphérie vers le centre des grains de ciment anhydres et leur volume est

inférieur aux réactifs. Cette diminution de volume peut être considérée comme un retrait chimique. Elle est couramment appelée contraction de le Châtelier.

A partir du début de prise, le développement de la formation des hydrates constitue un squelette devenant de plus en plus dense et résistant. La contraction, due à la différence de volumes entre produits et réactifs, va donc être progressivement restreinte. Cependant, l'eau ne peut compenser entièrement cette diminution de volume et se transforme alors en vapeur à l'intérieur des pores. Ces pores jouent le rôle d'interface liquide/vapeur et les tensions capillaires engendrées par ce changement de phase provoquent une compression du squelette rigide : ceci constitue une réduction de volume supplémentaire. Il s'agit du retrait d'auto dessiccation.

D'autre part, une composante supplémentaire peut s'ajouter à ce retrait plastique. En effet, si l'eau superficielle (due au ressuage) s'évapore plus rapidement qu'elle n'est formée, le dessèchement du béton crée une dépression qui contracte le matériau. On parle alors de retrait de séchage ou de dessiccation. L'hygrométrie ambiante, la présence de vent ou l'absence de produit de cure sont des paramètres influents sur la valeur de ce retrait de séchage. Une fois le retrait plastique (ou premier retrait) observé, une phase de gonflement peut également être constatée sur des matériaux cimentaires. Celle-ci a une durée très variable et encadre la prise.

Après la prise, les déformations du béton sont également d'origine hydrique (retrait endogène dû à l'autodessiccation) ou d'origine thermique (production de chaleur due à l'hydratation et échange thermique avec l'extérieur). Le retrait que subit alors le béton durci, ou retrait total, concerne la masse entière des éprouvettes et des ouvrages. Il se décompose en trois formes de retraits distincts : le retrait thermique, le retrait endogène et celui de dessiccation [22].

- Le premier est provoqué par le refroidissement du béton suite à son échauffement dû aux réactions d'hydratation. Deux grandeurs sont à prendre en compte dans ce phénomène : la quantité totale de chaleur dégagée et la cinétique de production de chaleur. Cette dernière dépend de la composition du liant, du rapport E/L, tandis que la chaleur totale libérée découle, elle, de la masse de ciment et d'additions.
- Ensuite, apparaît le retrait endogène, dû à l'hydratation du ciment. Cette réaction se poursuit après la prise et s'accompagne d'une diminution de volume, comme évoqué ci-dessus. Le retrait endogène, ou d'autodessiccation, est la conséquence macroscopique de cette contraction d'origine chimique.
- Enfin, le retrait de séchage, ou de dessiccation, est lié au séchage du matériau à partir de

sa surface extérieure. L'eau contenue dans les pores de la pâte de ciment (et retenue par des forces capillaires d'autant plus grandes que la dimension de ceux-ci diminue) s'évapore vers le milieu ambiant, dont l'humidité relative est moindre, et crée une dépression qui contracte l'élément en béton.

D'autre part, le béton peut réagir avec le gaz carbonique contenu dans l'air (en présence d'humidité) et subir une quatrième forme de retrait appelé retrait de carbonatation [23].

En pratique, les échantillons testés en laboratoire pour évaluer les différents retraits du béton durci sont conditionnés selon deux méthodes différentes. L'une consiste à sceller les éprouvettes pour éviter tout départ d'eau et permettre ainsi aux réactions d'hydratation de se poursuivre. Ces échantillons permettront de mesurer le retrait endogène. La deuxième laisse les éprouvettes libres de tout échange hydrique avec l'extérieur et conduit au retrait total. Conventionnellement, il est admis de soustraire le retrait endogène au retrait total pour obtenir le retrait de dessiccation, qui n'est pas une déformation concrètement mesurable.

La quantité de pâte élevée des BAP les rend susceptibles d'être plus déformables (rétractables, dans le cas présent) que les bétons vibrés. Cependant, les données de la littérature dans ce domaine ont tendance à se contredire principalement parce que les formulations comparées sont bien différentes, que ce soit en terme de rapport eau/ciment, ou de squelette granulaire (volume de pâte), etc.

a- Retrait plastique

Pour les déformations au jeune âge, autrement dit le retrait plastique, plusieurs travaux se sont attachés à les expliciter en étudiant notamment les différences potentielles de comportement entre BAP et béton vibré [24,25]. Les premiers auteurs observent des retraits plastiques deux à trois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés. Pour Turcry [25] (figure II.26), l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons vibrés.

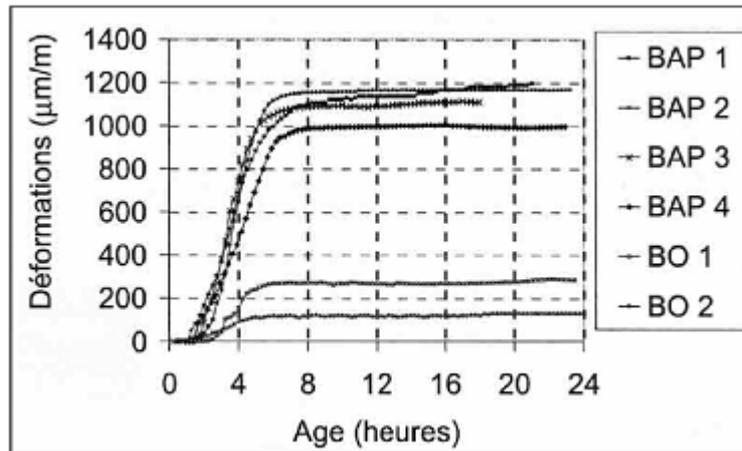


Figure II.26: Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés [25]

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 ces mêmes données, les fillers calcaires employés dans certaines proportions n'ont presque pas d'effet sur le retrait plastique.

b-Retrait endogène

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs [26] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés, d'autres [27] contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton. 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 va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique).

Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera 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 (ou E/L_{eq}), le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [27] (figure II.27).

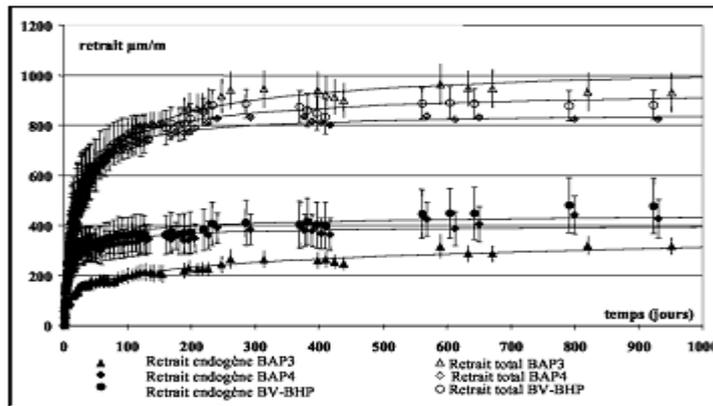


Figure II.27 : Retraits endogène et total d'un béton vibré et de deux BAP de résistance 60MPa[27]

Persson [19] montre aussi que les BAP sont sujets à des déformations libres (retraits endogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance (voir figure II.28).

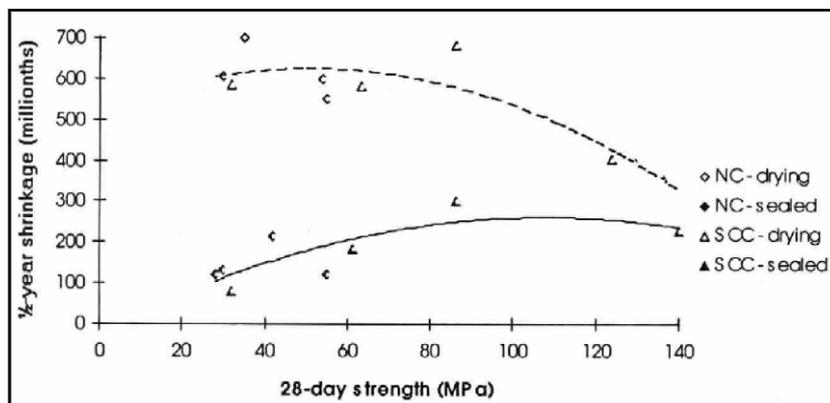


Figure II.28 : Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC) et BAP (SCC) en fonction de la résistance mécanique à 28 jours[19].

c- Retrait de dessiccation

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs [26] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (figure II.29). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

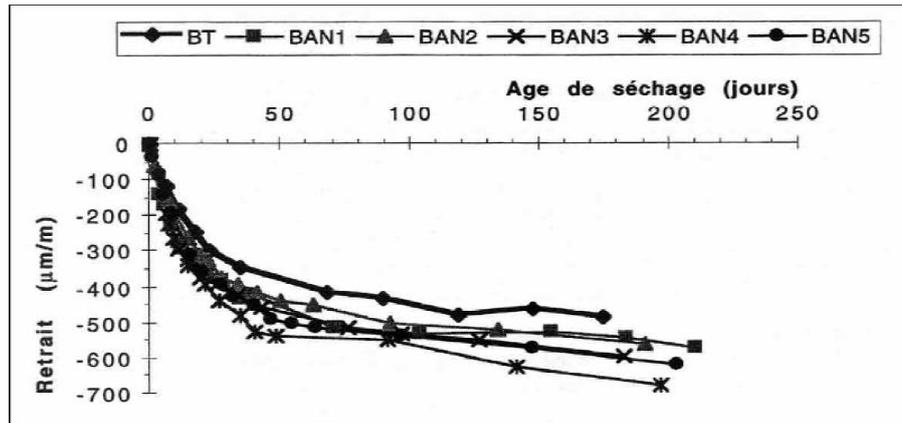


Figure II.29 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [26]

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [19,12]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 µm/m (à 180 jours). Enfin, d'autres auteurs [28] observent des retraits de séchage des BAP moins importants que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L car d'après [23], augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage.

Comme expliqué précédemment, le retrait de dessiccation provient de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton vers le milieu extérieur. Le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande et les tensions créées par cette perte en eau s'amplifient également.

Contrairement au retrait endogène, le retrait de dessiccation décroît donc avec la diminution du rapport E/C et les BAP ne font pas exception à cette règle. Enfin, étant donné sa présence fréquente dans les BAP, il est intéressant de connaître l'effet du filler calcaire sur le retrait de ces bétons. D'après Van [29], 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. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée [30].

II.9 CONCLUSION

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives aux principes, méthodes de formulations, essais de caractérisation à l'état frais, propriétés à l'état durci des bétons à hautes performances et des bétons Autoplaçant. Nous avons également reproduits quelques résultats sur la durabilité de ces bétons. Cette synthèse laisse apparaître que l'association des avantages des BHP (grandes performances mécaniques, durabilité accrue) aux avantages des BAP (grande fluidité) permet d'ouvrir de nouveaux horizons pour le matériau béton.

Cependant cette même synthèse a montré une rareté de recherches sur les BAP-HP, ainsi qu'une absence presque totale d'études nationales sur le sujet. C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail. Il est axé principalement sur l'étude de la composition d'un BAP présentant une résistance caractéristique supérieure à 60MPa et élaboré à partir de constituants locaux.

Chapitre III:

FORMULATION ET CARACTERISATION DES BAP-HP



III. FORMULATION ET CARACTERISATION DES BAP-HP

III.1 GENERALITES SUR LES CONSTITUANTS DU BETON

Le béton est un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Composé essentiellement de granulats (gravier, sable et filler), de ciment, d'eau de gâchage et d'adjuvants pour améliorer ou acquérir certaines caractéristiques ou propriétés pour faire face à des situations bien définies. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

III.1.1 Le ciment

C'est un liant minéral obtenu par décarbonatation d'un calcaire et décomposition d'une argile à une température avoisinant les 1450°C. Broyé sous forme d'une poudre fine souvent d'une couleur grise, en contact avec l'eau il s'hydrate et forme des minéraux hydratés très stables. Les principaux composés du ciment portland sont :

- les silicates tricalciques (alite) : $3CaO.SiO_2$ [C_3S]
- les silicates bicalciques (belite) : $2CaO.SiO_2$ [C_2S]
- les aluminates tricalciques : $3CaO.Al_2O_3$ [C_3A]
- les aluminoferrites tétracalciques : $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ [C_4AF]

Les silicates de calcium (C_3S) et (C_2S) représentent environ 75% de la masse du ciment. Les caractéristiques granulaires du ciment sont exprimées par sa granulométrie et sa finesse de mouture. Cette finesse de mouture appelée aussi surface spécifique de Blaine peut atteindre 4000 cm^2/g et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge.

III.1.1.1. Classification normalisée des ciments

La classification des ciments est faite de deux manières : soit d'après leur composition chimique, soit d'après leur classe de résistance.

a- Classification suivant la composition :

Selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme Algérienne NA442 donne la classification suivante:

1. CEM I Ciment Portland Artificiel (CPA);
2. CEM II Ciment Portland Composé (CPJ);
3. CEM III Ciment de Haut Fourneau (CHF);
4. CEM IV Ciment Pouzzolanique;
5. CEM V Ciment aux Laitiers et aux Cendres.

Ces ciments diffèrent par le type d'ajout et sa teneur, incorporé dans le but de modifier certaines de leurs propriétés en raison des conditions d'environnement ou de performances mécaniques auquel ces ciments sont destinés. Les différents types d'ajouts normalisés sont :

Laitier granulé de haut fourneau :

Le laitier est obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable. Le rapport massique $\frac{CaO + MgO}{dSiO_2}$ doit être supérieur à 1,0 (norme française NFP18-506).

Matériaux pouzzolaniques:

Ce sont des substances naturelles ou artificielles siliceuses ou silicoalumineuses, ou une combinaison de celles-ci contenant de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes mais la teneur en SiO_2 réactif doit être au moins égale à 25% en masse. Lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent à température ambiante, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium [$Ca(OH)_2$] dissous. On distingue :

- la pouzzolane naturelle (notée P) : matériau d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires ;
- la pouzzolane naturelle calcinée (notée Q) : matériau d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires, activés thermiquement.

Cendres volantes (V, W) :

Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. On distingue deux familles de cendres volantes :

- cendres volantes siliceuses (notée V) : ce sont principalement des particules sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont constituées essentiellement de silice (SiO_2) réactive et d'alumine (Al_2O_3) d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres composants. La teneur

en oxyde de calcium (CaO) doit être inférieure à 10% en masse, la teneur en silice (SiO_2) réactive doit être supérieure à 25% en masse.

- cendres volantes calciques (notée W) : elles présentent des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques, contenant une teneur en oxyde de calcium (CaO) réactif supérieure à 10% en masse, le reste étant de la silice (SiO_2) réactive, d'alumine (Al_2O_3), d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres composants.

Schiste calciné :

Il est produit dans un four spécial à une température avoisinant les 800°C, composé de silicate bicalcique et d'aluminate monocalcique, ainsi que de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, le schiste calciné finement broyé présente, outre des propriétés pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques.

Filler calcaire (L, LL) :

C'est un matériau très finement broyé. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers, tout en présentant une certaine activité physico-chimique en favorisant l'hydratation des silicates tricalciques. Les fillers calcaires utilisés comme ajouts doivent contenir :

- la teneur en calcaire ($CaCO_3$) $\leq 75\%$ en masse;
- la teneur en argile $\leq 1,20g/100g$;
- la teneur totale en carbone organique (TOC) $<0,2\%$ en masse pour le (LL) et $<0,50\%$ pour le (L).

Fumée de silice :

Elle provient de la réduction du quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique. Elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85% en masse en silice amorphe. Poudre d'une extrême finesse (de 15000 à 25000m²/Kg), ce qui lui donne la capacité de se placer dans les interstices des grains de ciments en diminuant la demande en eau du mélange (effet filler). Son dosage est cependant limité à 10% de la masse du ciment pour protéger les armatures dans le béton (problème de PH).

b). Classification des ciments suivant les résistances à la compression :

La norme NA442 classe les ciments courant d'après leur résistance à la compression déterminée conformément à la norme NA234, mesurée à 28 jours, en six classes de résistance (tableau II.1).

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2jours	7jours	28jours	
32,5	-	-	≥32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 13,5	-		
42,5	≥ 12,5	-	≥42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20	-		
52,5	≥ 20	-	≥52,5	-
52,5 R	≥ 30	-		

Tableau III.1: Exigences mécaniques garanties des ciments (norme NA442)

c). Classification des ciments suivant le type d'environnement :

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux, tels que :

Ciment PM :

Résistant à l'eau de mer, c'est un ciment courant possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (teneur limitée en aluminat tricalcique) qui lui donne une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

Ciment ES :

Résistant aux eaux sulfatées est un ciment courant présentant des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C₃A) afin d'avoir une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.

Ciments CP :

Pour béton précontraint, on distingue deux types de ciments qui diffèrent par leur teneur en ions sulfure SO_4^{2-} :

- ciments de la classe CP2 contenant moins de 0,2% d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par *pré-tension*,
- ciments de la classe CP1 contenant moins de 0,7% d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par *post-tension*.

Il existe par ailleurs des ciments spéciaux répondant à des conditions spécifiques (durcissement très rapide, résistance aux fortes chaleurs ou aux agressions chimiques). C'est le cas du ciment alumineux fondu, très résistant aux milieux acides.

III.1.2 Les granulats

C'est l'ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 et 125mm. Les granulats peuvent être d'origine naturelle (sables et graviers de mer et de rivières), artificiels (argile expansée) ou issue du recyclage de déchets de l'industrie (laitier de haut fourneaux).

Ils constituent l'ossature du béton et occupent 70 à 80% environ du volume d'un béton. Ils sont en principe inertes mais peuvent, dans certains cas, favoriser certaines réactions d'hydratation de certains minéraux du clinker c'est l'exemple des silicates tricalciques C_3S en présence de filler d'origine calcaire.

Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût économique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange (*ciment/eau*). En effet, la nature, la quantité, la forme, la granulométrie, la propreté, l'état de surface et le type de granulats sont des facteurs ayant une influence sur les caractéristiques du béton, aussi bien à l'état durci qu'à l'état frais.

Les principales divisions granulométriques des granulats données par la norme NA552 sont les suivantes :

- fillers 0/D où $D < 2\text{mm}$ avec au moins 70 % de passant à 0,063mm ;
- sablons 0/D où $D \leq 1\text{mm}$ avec moins de 70 % de passant à 0,063mm ;

- sables 0/D ou $1 < D \leq 6,3\text{mm}$;
- graves 0/D où $D > 6,3\text{mm}$;
- gravillons d/D où $d \geq 1$ et $D \leq 125\text{mm}$;
- ballasts d/D où $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$.

Les photos suivantes présentent quelques échantillons de granulats utilisés dans le présent travail



Figure III.1: Aperçu des granulats utilisés

Les caractéristiques essentielles des granulats destinés aux bétons hydrauliques sont les suivantes:

III.1.2.1. Le gravier :

D'après la norme NA463 l'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'éléments $< 0,5\text{mm}$. Le pourcentage de vase et d'argiles, éliminées lors de l'essai de propreté doit être $\leq 1,5\%$ pour gravillons n'ayant pas subi de concassage, et $\leq 3\%$ pour ce qui ont subi le concassage. La granularité du gravier est fixée par le D prescrit ou admissible pour le béton à préparer, l'absorption d'eau la norme NA451 fixe à 5% la valeur maximale pour les bétons hydrauliques.

III.1.2.2. Le sable :

La propreté du sable est déterminée par l'essai dit équivalent de sable conformément à la norme NF EN 933-8. D'une manière générale, l'on cherche un ES compris entre 80 % et 84%.

III.1.3 L'eau de gâchage

L'eau est un ingrédient essentiel du béton. Il joue deux fonctions principales: confère au béton sa maniabilité à l'état frais (propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement.

La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation, etc. L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences aux normes en vigueur. Les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, les eaux d'origine souterraine, les eaux de rejet industriel, l'eau de mer et les eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire (essais chimiques, physiques, etc.).



Figure III.2 : L'eau potable convient comme eau de gâchage

III.1.4- Les adjuvants

Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés généralement en faible quantité (moins de 5% de la masse du ciment sous forme de poudre ou de solution), avant ou pendant le malaxage, dans le but de modifier certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à l'état durci.

Les adjuvants sont classés par la norme NA775 suivant leurs actions principales, même s'ils ont plusieurs actions secondaires en :

- Plastifiant/réducteur d'eau;
- Superplastifiant réducteur d'eau;
- Rétenteur d'eau;
- Entraîneur d'air;

- Accélérateur de prise;
- Accélérateur de durcissement;
- Retardateur de prise;
- Hydrofuge de masse;
- Plastifiant/réducteur d'eau / retardateur de prise;
- Superplastifiant / haut réducteur d'eau/retardateur de prise;
- Plastifiant / réducteur d'eau / accélérateur de prise.

Il existe aussi d'autres adjuvants comme : les raidisseurs pour béton projeté, les adjuvants pour coulis d'injection, les adjuvants pour mortier stabilisé, les colorants, les inhibiteurs de corrosion, etc.

III.2 CHOIX ET CARACTERISATION DES CONTITUANTS DE BASE DES BETONS D'ETUDES

Nous allons présenter dans ce chapitre les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du béton. Le choix des matériaux s'est porté; sur la disponibilité dans la région de Guelma. Les matériaux utilisés sont:

- Un sable de carrière issu de la région de Bendjerah (wilaya de Guelma).
- Un gravier concassé: 5/12 ; 8/16 de la carrière de (Bendjerah).
- Le ciment CPJ (classe 42.5) de Hedjar Essoud -skikda-
- Fumée de silice.
- L'eau de gâchage au niveau de laboratoire LGCH – Guelma –

III.2.1 Sable

a/ Analyse granulométriques

Tableau III.2 Analyse granulométrique du sable

Maille (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumule		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
3.35	30	30	1.5	98.5
2	300	330	16.5	83.5
1.18	404	764	36.7	63.3
0.6	410	1144	57.2	42.8
0.425	166	1310	65.5	34.5
0.3	160	1470	73.5	26.5
0.212	140	1610	80.5	19.5
0.15	130	1740	87	13
0.063	172	1912	95.6	4.4
0.063	88	2000	100	0

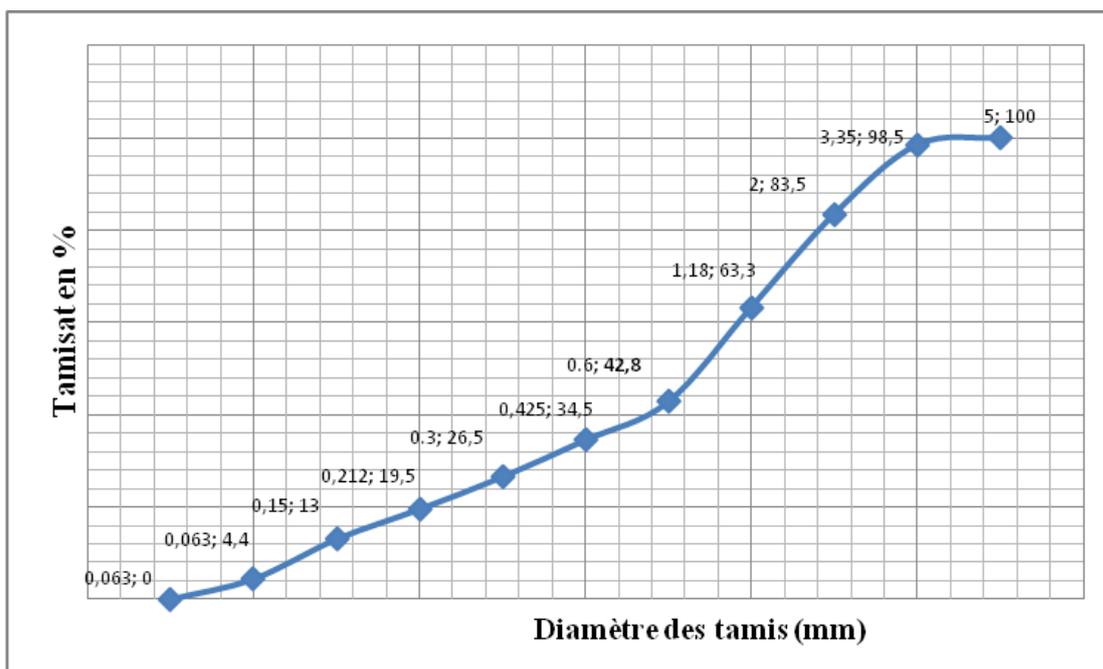


Figure III.3 courbe granulométrique du sable

Commentaires sur les résultats

- Le pourcentage retenu en poids entre deux tamis successifs est inférieur à 40%, le sable a une granularité continue.
- Le pourcentage des fines (le passant à 0.08) est 8.6%, inférieur à 10 %, d'après la norme NF P18-301 c'est un sable propre.
- 52.5% des grains de sable ont un diamètre compris entre 0.6 et 5 mm, c'est un sable gros.
- C'est un sable propre à faible pourcentage des fines argileux convenants parfaitement pour les bétons de haute qualité.

b/ Résultats des essais physiques

Les caractéristiques physiques des sables utilisées sont déterminées expérimentalement au laboratoire de génie civil et hydraulique de l'université de Guelma, dont les résultats d'essais sont exprimés dans le tableau suivant:

Tableau III.3 Résultats des essais physiques sur le sable

Caractéristiques		Résultats des mesures	NORMES
Masse spécifique «absolue» (kg/m ³)		2530	NF EN 1097-6
Masse spécifique «apparente» (kg/m ³)		1470	
Equivalent de sable	E.S.V (%)	84	NF EN 933-8
	E.S.P (%)	80	
Teneur en eau (%)		0.22	NF EN 18-555

III.2.2 Graviers

Pour la confection de nos bétons, deux fractions de graviers de la carrière de concassage (Bendjerah) implanté dans la région de Guelma ont été choisies, les fractions 5/12 et 8/16.

Gravier 5/12

a/ Analyse granulométrique

Tableau III.4 Analyse granulométrique du gravier 5/12

Tamis (mm)	Refus partiel (gr)	Refus cumules (gr)	Refus cumules (%)	Tamisât en %
20	20	20	0.4	99.6
10	3247	3267	65.3	34.7
5	1513	4780	95.6	4.4
2.5	130	4910	98.2	1.8
0.8	43	4953	99.1	0.9
0.4	11	4964	99.3	0.7
0.2	11	4975	99.5	0.5
0.1	7	4982	99.6	0.4
0.08	10	4985	99.7	0.3
Fines	12	4997	99.9	0.1

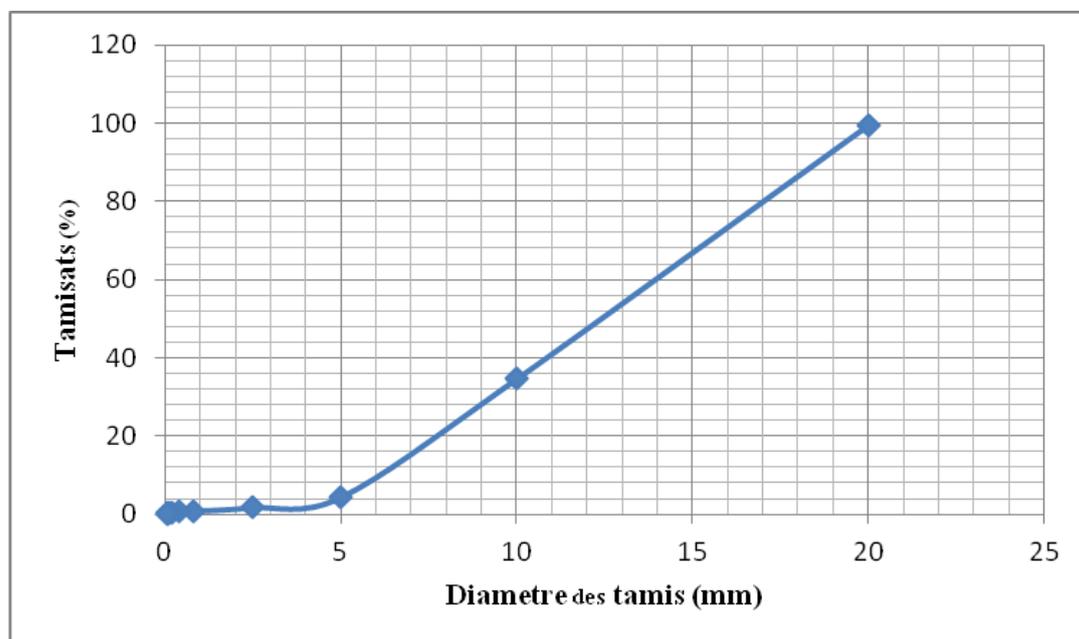


Figure II.4: Courbe granulométrique du gravier G 5/12

Détermination du coefficient d'aplatissement A

Rappelons que pour une classe granulaire d/D donnée, on peut définir un coefficient d'aplatissement partiel A_i défini par l'expression suivante :

$$A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} 100$$

avec :

M_{gi} = masse de la classe granulaire d/D,

M_{ei} = masse passant à travers le tamis à fentes d'écartement E correspondant.

Le coefficient d'aplatissement global A s'exprime en intégrant les valeurs partielles déterminées sur chaque classe granulaire :

$$A = \frac{\sum_i M_{ei}}{\sum_i M_{gi}}$$

A partir de cette expression, nous avons calculé le coefficient d'aplatissement du gravier et qui s'élève à 22,8%. Par ailleurs, le taux en fines est de 1,38%.

b/ Résultats des essais physiques

Tableau III.5 Résultats des essais physiques sur le gravier 5/12

Caractéristiques	Résultats des mesures
Masse spécifique «absolue» (kg/m ³)	1476
Masse spécifique «apparente» (kg/m ³)	2650
Propreté (%)	P = 1.10
C=0.60	C = 0.60
Dureté (Los Angeles)	L _A = 20.3
Teneur en eau (%)	0.4
Absorption d'eau (%)	1.8

Gravier 8/16

a/ Analyse granulométrique

Tableau III.6 Analyse granulométrique du gravier 8/16

Tamis (mm)	Refus partiel (gr)	Refus cumules (gr)	Refus cumules (%)	Tamisât en %
31,5	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16,1	105	105	4	96
11,2	14515	1520	58	42
8	865	2385	91	9
4	210	2595	99	1
0.063	13	2608	99,5	0,5

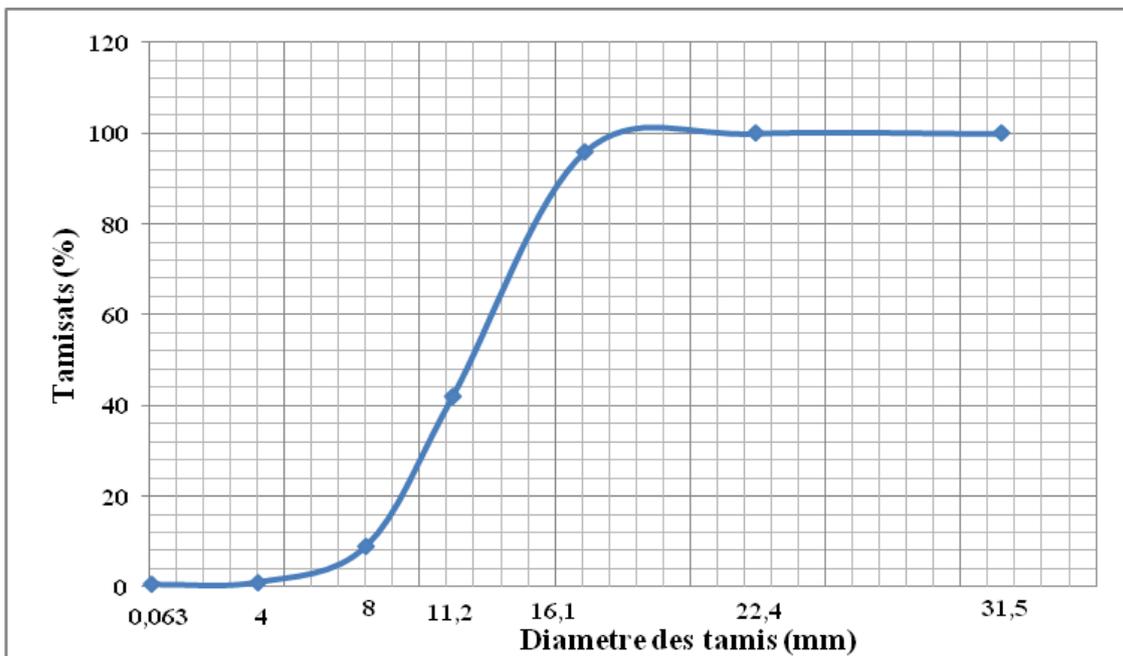


Figure III.5: Courbe granulométrique du gravier G 8/16

Ses autres caractéristiques sont :

- coefficient d'aplatissement = 14,9%
- teneur en fines = 0,4%

b/ Résultats des essais physiques :

Les résultats des essais physiques sont reproduits par le tableau suivant :

Tableau III.7 : Masse volumique réelle et coefficient d'absorption du gravier G8/16

Grandeur physique	Valeur
Masse volumique absolue	2630 kg/m ³
Masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve	2610 kg/m ³
Masse volumique réelle saturée (surface sèche)	2620 kg/m ³
Coefficient d'absorption	0,27

c- Résistance à la fragmentation par chocs (essai Los Angeles, norme NA458)

L'essai consiste à mesurer la masse d'éléments inférieurs à 1.6mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés; dans le cylindre de la machine Los Angeles pendant 500 rotations.

Le coefficient de Los Angeles, noté L_A , est donné par l'expression suivante :

$$L_A = \frac{M_f}{M_g}$$

avec :

M_f : la masse du matériau soumis à l'essai ;

M_g : la masse des éléments dont la taille est inférieure à 1,6 mm

Tableau III.8 : Valeur de la dureté au Los Angeles du gravier utilisé

Classe granulaire (mm)	M (gr)	m' (gr)	m = M-m'	LA = M-m'/M
8/16mm	5000	3793	1207	24,1
$L_A = 24,1$				

On peut voir à travers la valeur moyenne de la dureté trouvée (24,1), que notre gravier répond à la norme qui limite le L_A à 40%. Signalons que le recours aux bétons à haute résistance nécessite des graviers à faible valeur du Los Angeles.

III.2.3 ciment

Le ciment de base utilisée dans notre travail, est un ciment portland composé CPJ de classe 42.5, qui provient de la cimenterie de Hedjar Essoud –skikda.

Le type de ciment utilisé dans notre travail de recherche, est un ciment portland composé CPJ/CEM/II/A(42,5) provenant de la cimenterie de Hdjar-Essoud. Sa composition chimique moyenne est donnée dans le tableau II.9 :

Tableau III.9 Composition chimique moyenne du ciment CPJ CEM II/A utilisée

	<i>CaO</i>	<i>Si O₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>MgO</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	<i>SO₃</i>	<i>PAF</i>	<i>MnO</i>
CPJ CEM II/A 42,5	58,6	24.92	6.58	3.65	1.21	085	0.08	2.17	1.7	/

Ses autres propriétés sont :

Tableau III.10: Caractéristiques physiques du ciment utilisé

Caractéristiques	Ciment (CPJ, classe 42.5)
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.1
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.12
Surface spécifique (cm ² /g)	3702



Figure III.6 Ciment CPJ CEM II/A 42,5 (C) utilisé

Le choix du CPJ42,5 s'explique aisément par le fait que c'est pratiquement le seul ciment courant disponible au niveau local. D'une manière générale, le choix du ciment dépend, notamment de la résistance souhaitée du béton (soit environ 50MPa, dans ce cas précis), des impératifs de mise en œuvre, et de l'environnement de l'ouvrage. Ainsi vue la résistance souhaitée, il aurait été souhaitable, dans le cas où il y a disponibilité, d'utiliser un CPJ de classe supérieure (55R). Cependant plusieurs auteurs sont arrivés à formuler des bétons à forte résistance avec le même type de ciment que le notre, ce qui nous conforte dans notre choix.

III.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est l'eau disponible au niveau de laboratoire de génie civil et d'hydrauliques de l'université de Guelma.

III.2.5 Medaplast HP (Fumée de silice)

Le MEDAPLAST HP est un ajout, qui se présente sous forme de poudre (voir photo de la figure 2.20). Il est utilisé pour confection de bétons à hautes performances. Selon sa fiche technique (voir annexe) il permet en effet :

- d'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées,
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques.



Figure III.7 Le Medaplast HP utilisé

Tableau III.11 Composition chimique de la fumée de silice

SiO ₂	FeO ₃	CaO	K ₂ O
92%	0.25%	2.4%	1.0%

Tableau III.12 Propriétés physiques de la fumée de silice

Granulométrie (μm)	Diamètre (μm)	Surface spécif (cm^2/g)	Densité réelle
0.02-2	0.1	15-30	2.3

- Dosage :

Le dosage du MEDAPLAST HP dépend des performances recherchées. Dans notre travail de formulation, et après quelques essais préliminaires pour déterminer le seuil optimal en adjuvant, nous avons fixé le taux de Medaplast HP à 10,72% du poids du ciment pour l'ensemble des compositions étudiées.

III.2.6. Superplastifiant:

Le MEDAFLOW 30 est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et des mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.



Figure III.8 Super plastifiant utilisé

III.2.6.1 Caractéristiques de MEDAFLOW 30:

Forme.....	liquide
Couleur.....	jaunâtre
PH.....	6-6.5
Densité.....	1.7±0.01
Teneur en chlore.....	< 1g/l
Extrait sec.....	30%

a/ Propriétés et effets :

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très faible.
- l'amélioration considérable de la fluidité.
- une très bonne maniabilité.
- un long maintien d'ouvrabilité.
- d'éviter la ségrégation.
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (tableau II.20).
- de diminuer la porosité.
- d'augmenter la durabilité.
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration.

➤ **Tableau III.13** Evolution des résistances mécaniques du béton contenant le Medaflow30

Désignation	Résistance en compression (MPa)		
	3jours	7jours	28jours
MEDAFLOW 30 (1,4 %)	39,2	54,7	62,2

b- Domaines d'application

- bétons à hautes performances.
- bétons auto – plaçant
- bétons pompés.
- bétons précontraints.
- bétons architecturaux.

c- Dosage

Plage de dosage : 1% à 3% du poids de ciment. Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton.

III.2- MATERIAUX ET FORMULATION DES BETONS D'ETUDES

De manière la plus générale le matériau béton, est un composite dans lequel on distingue deux phases : la matrice ou pâte de ciment durcie (ciment et eau) et les granulats (gravillons et sable). Le béton représente 60 à 70% des dépenses engendrées par la construction.

L'objectif principal visé dans cette partie est d'améliorer les propriétés rhéologiques du béton à hautes performances (supérieure à 60 MPa) sans modification des performances mécaniques. L'étude du passage d'un BHP à un BAP. HP requiert la caractérisation rhéologique (fluidité et capacité de passage entre armatures) en fonction des paramètres de la formulation du béton tels que la fraction volumétrique solide ϕ et le rapport Gravillon/ Sables

Pour cela nous avons confectionné cinq bétons en faisant en jouant essentiellement sur le facteur "dosage Superplastifiant" et les autres paramètres ont été fixés. Nous avons mesuré l'ouvrabilité et les résistances à la compression à différentes échéances, et un BO (béton témoin) pour le besoin de comparaison.

III.2.1. Matériaux utilisés

Les différents constituants utilisés sont :

- un ciment de type CPJ-CEM IIA 42,5 provenant de la cimenterie de Hdjar Essoud.
- de la fumée de silice commercialisée sous le nom de Medaplast HP par Granitex.
- Un sable de carrière issu de la région de Bendjerah (wilaya de Guelma).
- Deux type de graviers concassés: 5/10, 8/16 de la carrière de (Bendjerah).
- Un Superplastifiant dénommé MEDAFLOW 30 et fabriqué par la firme Algérienne Granitex.

III.2.2. Formulation des bétons à haute performance

III.2.2.1. Formulation de départ

Comme nous l'avons déjà signalé au premier chapitre, la composition des BHP différent complètement de celle des bétons ordinaires.

Cette composition de départ se présente comme suit (pour 1 m³):

- ciment = 485 kg,
- Fumée de silice (Médaplast HP) comme substitution au ciment = 52 kg (soit 10,7% de la masse du ciment),
- sable = 770kg,
- gravier = 1050kg,
- adjuvant (MEDAFLOW 30) =14,55 kg (soit 3% de la masse de ciment), (2.7% de la masse des liants)
- eau de gâchage 145kg,

III.2.2.2 Détermination des compositions des différents BHP :

Les compositions des bétons testés, notés respectivement B₁, B₂, B₃, B₄, B₅ sont rassemblées dans le (Tableau III.14)

Tableau III.14 : Compositions et paramètres de formulation des bétons d'étude

<i>Composition (kg/m³) et paramètres de formulation</i>	<i>Désignation des bétons</i>					
	B₁	B₂	B₃	B₄	B₅	BO
<i>Ciment</i>	485	485	485	485	485	400
<i>Medaplast HP</i>	52	52	52	52	52	-
<i>Sable de carrière</i>	770	770	770	770	770	570
<i>Gravillons 5/10</i>	426	426	426	426	426	367
<i>Gravillons 8/16</i>	624	624	624	624	624	537
<i>Medaflow 30</i>	4.85	7.27	9.5	12.12	14.55	-
<i>Eau efficace</i>	145	145	145	145	145	212.5
<i>Rapport G/S</i>	1.363	1.363	1.363	1.363	1.363	1.607
<i>Rapport E/C</i>	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.53
<i>Rapport E/L_{eq}</i>	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	-
<i>Rapport F/ L_{eq}</i>	0.096	0.096	0.096	0.096	0.096	-
<i>Fraction volumique granulaire φ</i>	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68

III.3- GACHEES D'ESSAIS ET CARACTERISATION DES BETONS A L'ETAT FRAIS

Les bétons présentés dans le tableau III-2 ont été testés pour déterminer la fluidité selon les prescriptions du Guide Européen pour les bétons a haute performance.

Les essais réalisés pour chaque béton sont :

1. L'essai en milieu non confiné (étalement au cône) ;
2. L'essai de stabilité (résistance à la ségrégation et au ressage) ;
3. L'essai en milieu confiné (essai de la boîte en L) ;

III.3.1- Essai d'étalement au cône d'Abram's (Slump flow)

L'essai est réalisé avec le cône d'Abrams et consiste à mesurer, une fois le béton étalé, le diamètre final sur deux lignes perpendiculaires et à prendre la moyenne.

Un exemple de mesure de l'étalement au cône d'Abram's est illustré à travers la série de photos suivantes :



Figure III. 9: Exemple de mesure de l'étalement

L'étalement moyen mesuré au cône des différents bétons est reproduit dans le tableau ci-après :

Tableau III.15: Récapitulatif des résultats des essais d'étalement au cône

MEDAFLOW 30					
Dosage : (1% - 3%)					
Désignation du béton	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Dosage d'adjuvant	1%	1,5 %	2%	2.5%	3%
Etalement au cône (cm)	35	40.2	49	53.2	61.3
Mesure de l'étalement $\varepsilon = [(D - 25) / 25] \times 100$	40%	60,8%	96%	112,8%	145,2%

III.3.2- Essai de la boîte en L

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

Principe : 13litres de béton sont mis dans la partie verticale puis on laisse le béton se reposer pendant 1 minute. La trappe est ensuite levée et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure H₁ et H₂ et le résultat est exprimé en terme de taux de remplissage (H₂/H₁).

Cet essai permet d'évaluer ainsi l'écoulement en milieu confiné, le risque de blocage et la ségrégation dynamique.

Les figures suivantes montrent la procédure entreprise pour la mesure des hauteurs H_1 et H_2 de la boîte en L pour le B₅.



Figure III.10: Exemple de mesure de la fluidité à la boîte en L pour le B₅

Tableau III-16 Récapitulatif des résultats des essais à la boîte en L

Désignation du béton	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	Valeurs cibles
(H_2/H_1)	-	-	-	0.81	0.88	Valeur cible sup à 0,8

III.3.3- Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à apprécier le risque de ségrégation des BAP. Il complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

Principe : On dresse la courbe des valeurs d'étalement obtenues en fonction de différents dosages en eau et on détermine une plage pour laquelle la formule est satisfaisante vis-à-vis de la ségrégation et du ressuage.

- peser le fond avec la laitance. Nous avons $P_{laitance} = P_{fond+laitance} - P_{fond}$
- calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon selon l'expression suivante :

$$\pi = \left(\frac{P_{laitance}}{P_{échantillon}} \right) .100\%$$

En fonction du % de laitance, on pourra déduire la nature de la stabilité conformément au tableau suivant :

Tableau III.17 : Critères d'acceptabilité pour l'essai de stabilité au tamis

% de laitance	Nature de la stabilité
$0\% \leq \% P_{laitance} \leq 15\%$	stabilité satisfaisante
$15\% < \% P_{laitance} \leq 30\%$	stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ)
$\% P_{laitance} > 30\%$	stabilité très mauvaise (ségrégation systématique- béton inutilisable)

La démarche adoptée pour mesurer la stabilité est représentée à travers les photos suivantes :



Figure III.11 : photos illustrant l'essai de stabilité au tamis

Les résultats sont reproduits dans le tableau suivant :

Tableau III.18: résultats des mesures de la stabilité des bétons

Désignation du béton	B₁	B₂	B₃	B₄	B₅	Valeur cible
Stabilité au tamis (%)	0.4	0.8	1.1	1.8	2.4	$\pi \leq 15\%$

III.3.4- Essai d'entonnoir

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante: l'entonnoir est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé.

Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto plaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le BAP.



Figure III.12: Mesure du temps d'écoulement du B₅

Les mesures du temps d'écoulement des bétons sont reportées dans le tableau III.19

Tableau III.19 : Temps d'écoulement au V funnel des bétons

Désignation du béton	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	Valeurs cibles
Entonnoir (V Funnel) (s)	54,2	45,1	35,5	13,7	13,1	Entre 8 et 14 s

III.3.5- Résultats et discussion

Une fois mesurées, les différentes grandeurs vont être représentées sous formes d'histogrammes.

Essai d'étalement :

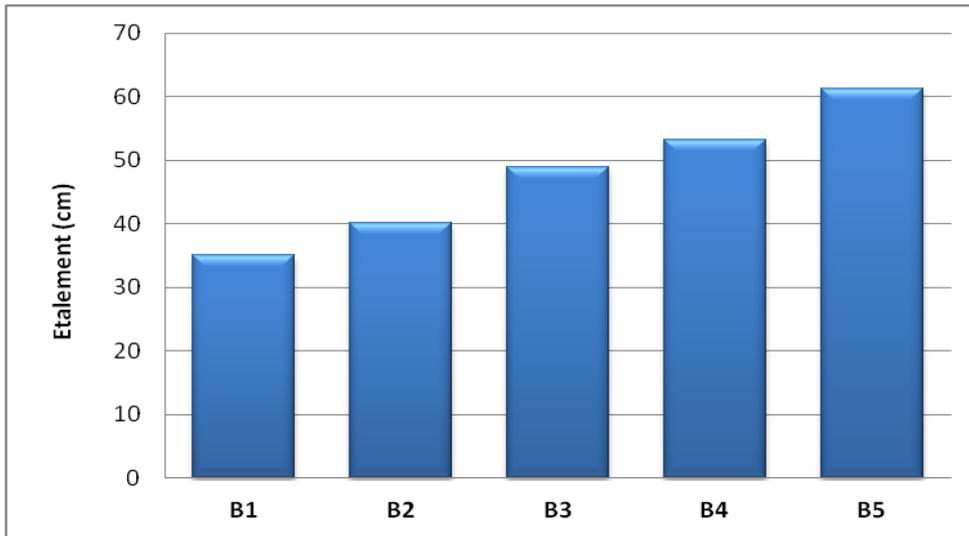


Figure III.13 : Etalement au cône d'Abrams de tous les échantillons confectionnés

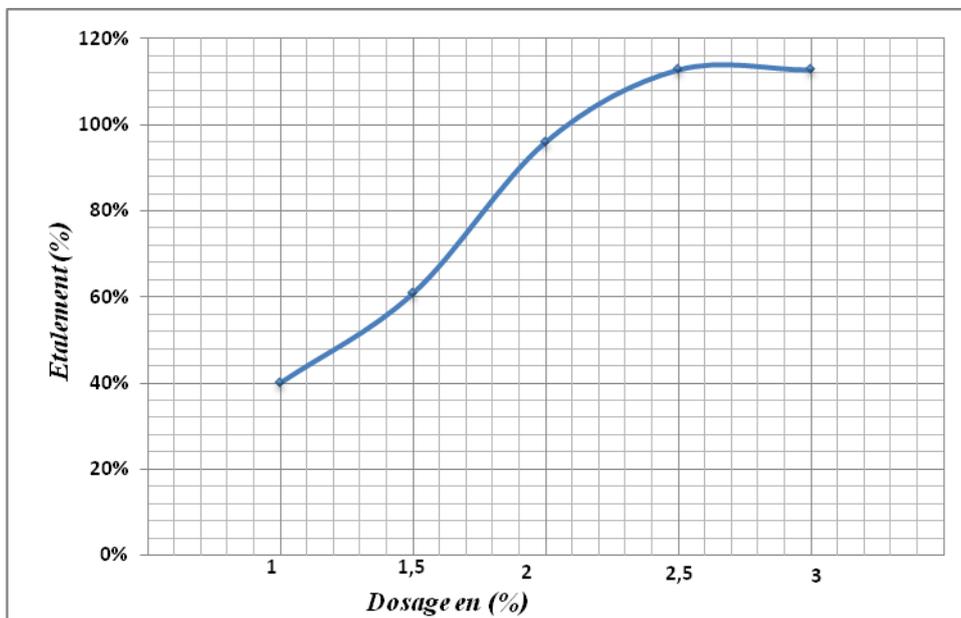


Figure III.14 : Etalement en fonction du % en Superplastifiant

Sur l'étalement au cône nous pouvons constater que les trois premières compositions ne respectent pas le critère d'étalement à l'exception la composition B₄ et B₅ dont l'étalement est de 61.3cm.

Nous avons également mesuré pendant le déroulement de cet essai la consistance du béton ordinaire (BO) au traditionnel étalement au cône, et nous avons trouvé un affaissement moyen de 7cm, (béton plastique : de 5 à 9cm d'après la norme NF/EN 206-1).

Ségrégation dynamique

Concernant la ségrégation dynamique (boite en L) des bétons, le plus important dans l'essai est que le béton testé s'écoule à travers les armatures correctement. Sur ce point, deux compositions (voir figure suivante) présentent un taux de remplissage supérieur à 0,8 et trois inférieures à la limite autorisée.

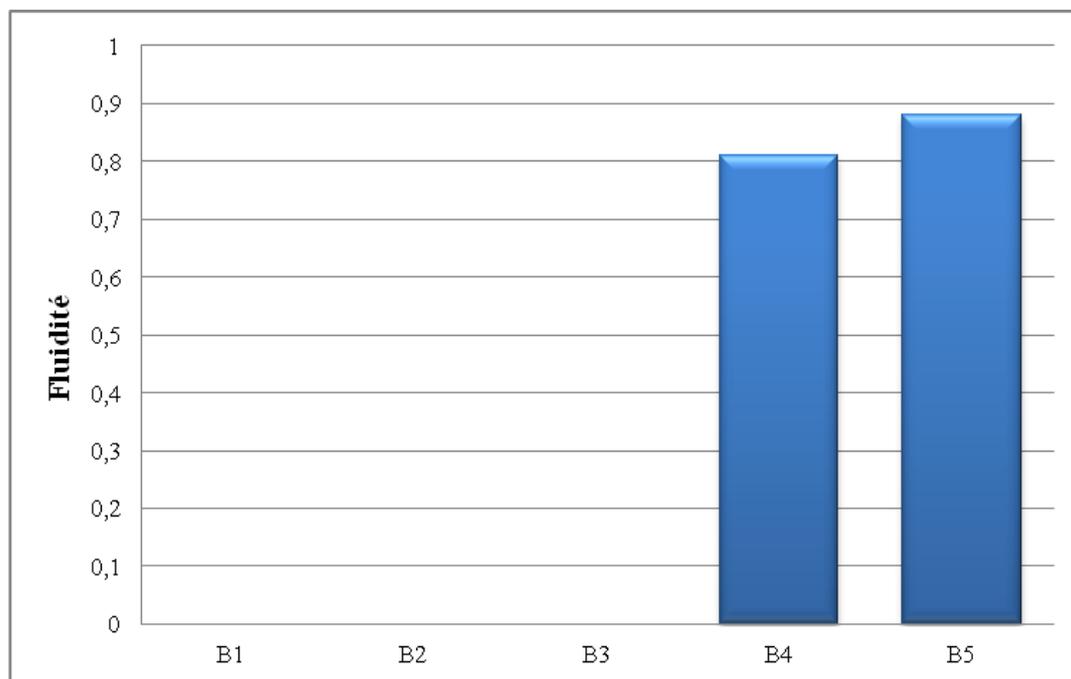


Figure III.15: Fluidité des différents bétons confectionnés

Essais au tamis :

Sur la ségrégation statique (essai au tamis), toutes les compositions ont un taux de ségrégation inférieur à 15%, synonyme d'une stabilité correcte (figure III.8)

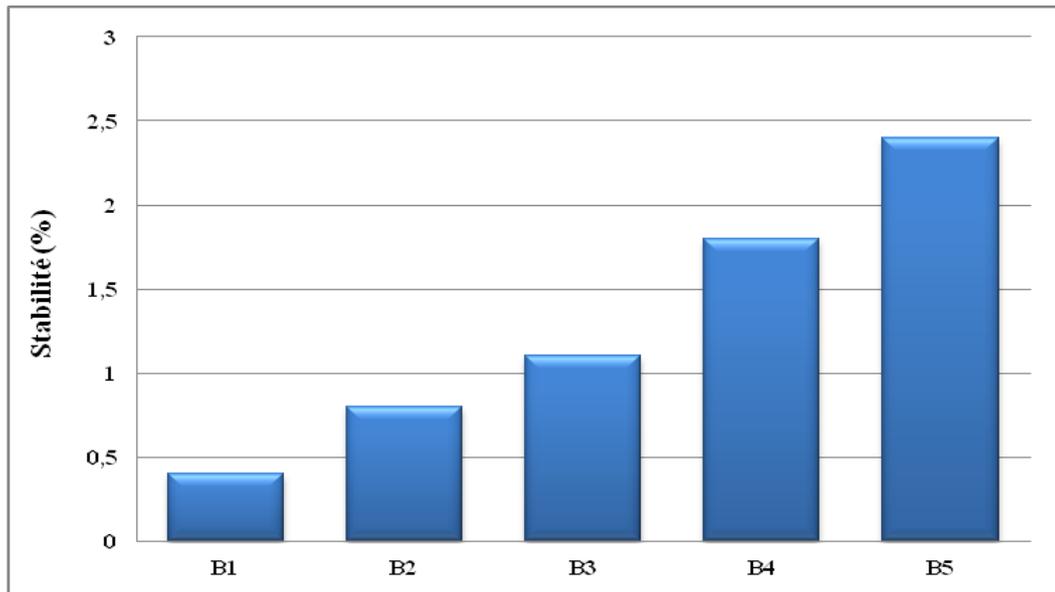


Figure III.16: Stabilité au tamis des différents bétons confectionnés

V Funnel :

Enfin, concernant l'écoulement à l'entonnoir, seuls les bétons B₄, B₅ présentent un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes, limites qui caractérisent un BAP pour cet essai (Figure III.9).

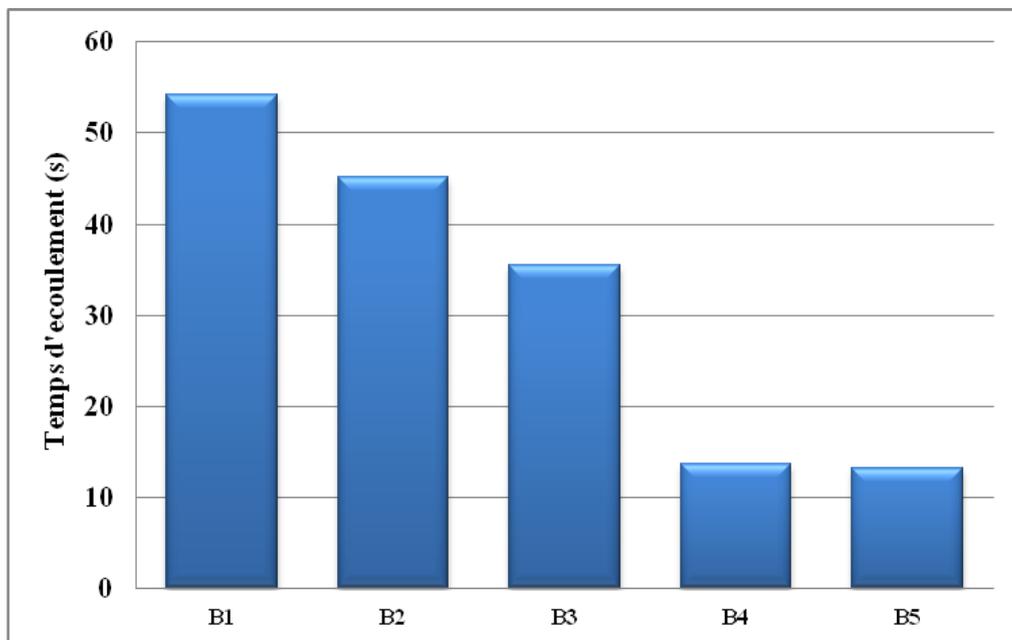


Figure III-17: Ecoulement à l'entonnoir (V funnel) des bétons confectionnés

III.4- INFLUENCE DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS A L'ETAT FRAIS

En gardant les paramètres : $[G/S]$, $[E/L_{eq}]$, taux de substitution en Médaplast HP (fumée de silice) , la variation du dosage en Superplastifiant peut avoir les influences suivantes :

III.4-1 : Influence du dosage en Superplastifiant sur l'étalement des bétons.

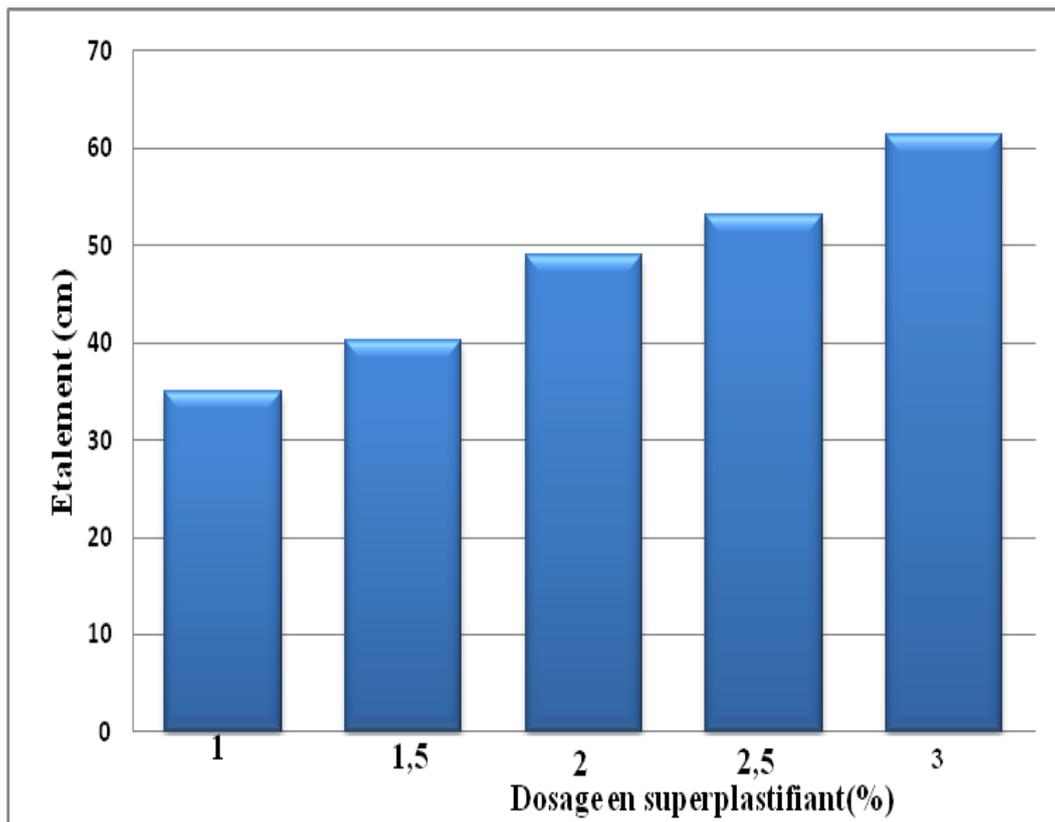


Figure III.18: Influence de la variation du dosage en Superplastifiant sur l'étalement des bétons

III.4-2 : Influence du dosage en Superplastifiant sur la ségrégation dynamique (H_2/H_1).

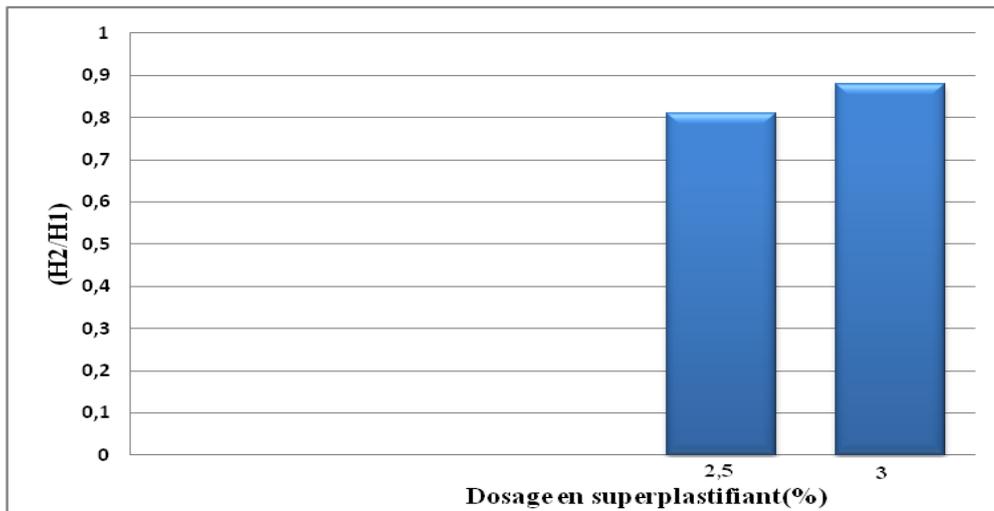


Figure III.19 : Influence de la variation du dosage en Superplastifiant sur la ségrégation dynamique

III.4-3 : Influence du dosage en Superplastifiant sur la résistance à la ségrégation statique et le ressuage

On constate que la diminution du rapport influence positivement sur la stabilité à la résistance à la ségrégation statique et au ressuage des bétons dont dosage en Superplastifiant varie entre 2.5% et 3% et qui présentent un taux inférieur à 15%, synonyme d'une stabilité correcte.

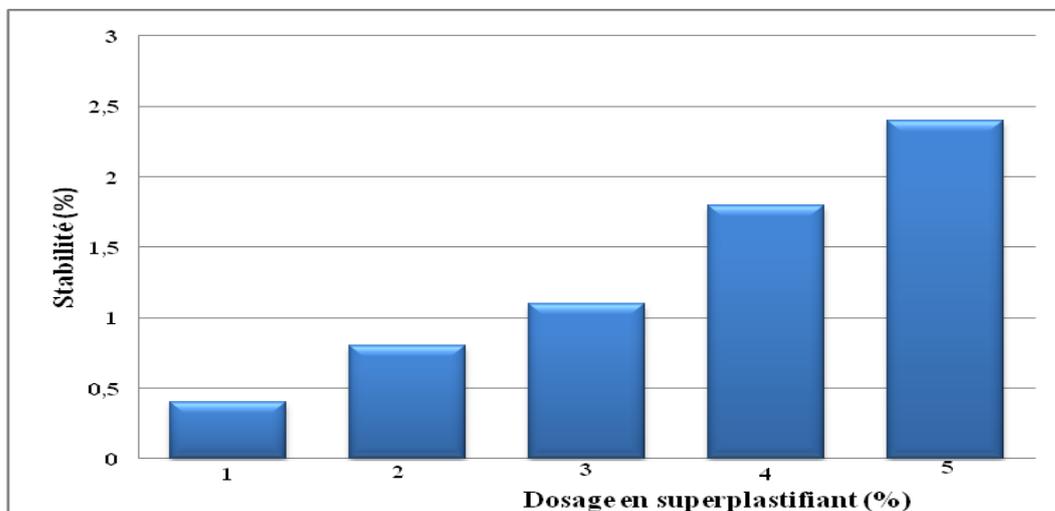


Figure III.20: Influence de la variation du dosage en Superplastifiant sur la résistance à la ségrégation statique.

III.4-4 : Influence du dosage en Superplastifiant sur le temps de l'écoulement à l'entonnoir

On remarque que les bétons présentant un dosage en Superplastifiant variant entre 2,5% et 3% offrent un temps d'écoulement compris entre 8 et 14s, synonyme d'un écoulement correcte (figure III.21).

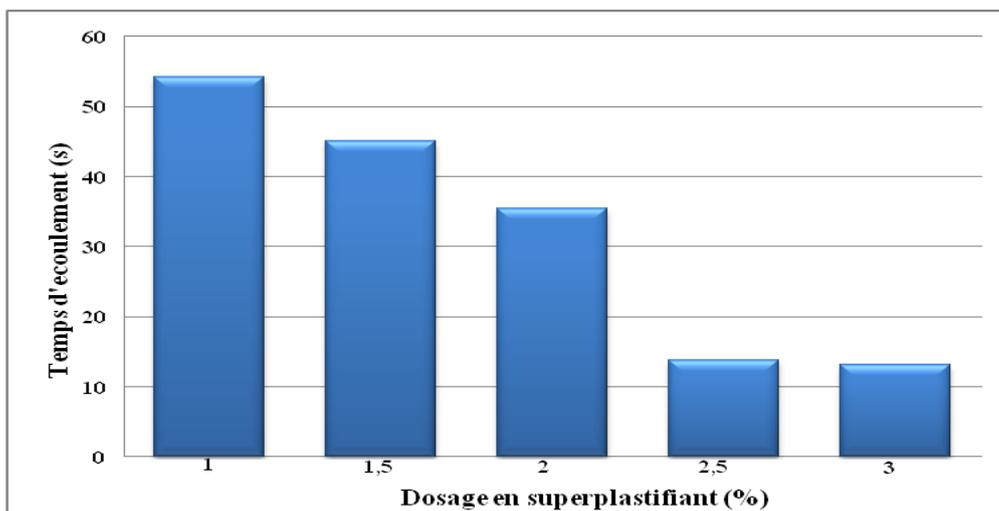


Figure III.21: Influence du dosage en Superplastifiant sur le temps d'écoulement à l'entonnoir

III.5. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré aux :

- *Choix et caractérisation des constituants du béton. En premier lieu, le choix s'est porté sur des matériaux locaux et disponibles. En effet dans la confection du béton, le choix des granulats porte souvent sur des matériaux disponibles. Pour les ajouts cimentaires, nous avons opté pour les fines Fumée de silice – Granitex- par l'entreprise nationale des granulats. Enfin concernant le superfluidifiant, notre choix s'est porté sur la MedaFlow30 de la firme nationale Granitex.*
- *L'étude des propriétés rhéologiques à l'état frais des bétons en fonction des variations d'un seul paramètre de formulation conduit aux résultats suivants :*

A partir de ces considérations deux formulations, parmi les cinq testés répondent aux exigences de l'AFGC et au Guide Européen pour les BAP sur :

1. L'étalement au cône.
2. la stabilité au tamis.
3. l'écoulement à la boîte.
4. l'écoulement à l'entonnoir peuvent être retenues et considérées comme béton Autoplaçant.

Le tableau suivant récapitule les propriétés des compositions retenues et qui font faire l'objet d'une caractérisation mécanique.

Composition kg /m³ et paramètres de formulation	Désignation des bétons		
	BAP₄	BAP₅	BO
<i>Sable de carrière</i>	770	770	570
<i>Gravillons (5/12)</i>	426	426	367
<i>Gravillons (8/16)</i>	624	624	537
<i>Ciment CPJ-CEM IIA 42,5</i>	485	485	400
<i>Medaplast HP (fumée de silice)</i>	52	52	-
<i>Medaflow 30 (superplastifiant)</i>	12.12	14.55	-
<i>Eau efficace</i>	145	145	212.5
<i>Fraction volumique granulaire ϕ</i>	0.68	0.68	0.68
<i>Rapport G/S</i>	1.363	1.363	1.607
<i>Rapport E/L_{eq}</i>	0.27	0.27	-
<i>Rapport E/C</i>	0.29	0.29	0.53
<i>Rapport F/L_{eq}</i>	0.096	0.096	-

Tableau III.20 : Formulations retenues de différents bétons

Chapitre IV:

*CARACTERISATIONS MECANIQUES
DES COMPOSITIONS RETENUES*

IV : CARACTERISATIONS MECANIKES DES COMPOSTIONS RETENUES

IV.1. INTRODUCTION

Le chapitre précédent a montré qu'il est possible d'affecter grandement les propriétés rhéologiques d'un béton en augmentant la teneur en Superplastifiant. Ces résultats ne sont pas suffisants si l'on ne connaît pas l'incidence de telles variations sur les propriétés mécaniques (compression simple et traction par fendage).

IV.2 . COMPOSITION DES BETONS ETUDIES

Les bétons qui ont fait l'objet de la présente étude sont des bétons à base des matériaux locaux. La conception de tous les bétons d'études et tous les essais ont été réalisés conjointement au sein du laboratoire L.G.C.H de l'université 8 mai 1945 (Guelma).

Tableau IV.1 : Désignations et notations des bétons retenus

<i>Béton étudié</i>	
<i>Notation</i>	<i>Désignation</i>
<i>B₄</i>	<i>Béton étudié avec S_p = 2,5%</i>
<i>B₅</i>	<i>Béton étudié avec S_p = 3%</i>
<i>BO</i>	<i>Béton ordinaire (ou vibré) avec E/C = 0,53</i>

IV.2.1- Propriétés étudiées

Pour chacune des compositions énumérées dans le tableau (IV.1), nous avons réalisé expérimentalement l'étude des propriétés suivantes :

- 1- la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours sur des éprouvettes cubiques
- 2- la résistance à la traction par fendage à 7, 14 et 28 jours.

IV.2.2- Formulation des bétons étudiés

Les bétons étudiés sont confectionnés selon la méthode proposée au chapitre III en remplaçant une fraction massique (taux de substitution) de ciment par le Medaplast HP (fumée de silice) et en augmentent la teneur en superfluidifiant.

Le critère de comparaison choisi étant la résistance mécanique en compression. Nous avons travaillé sur un type de béton de résistance supérieure à 60MPa , conduisant à l'obtention de bétons que l'on peut classer dans la catégorie «Haute performance».

L'expérience en matière de formulation et de suivis techniques nous a permis de retenir deux compositions des bétons étudiés, en conservant les quantités de : (fumée de silice), le dosage en ciment et la quantité des granulats identiques.

Les compositions, des bétons, retenues pour cette étude sont présentées dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Compositions des bétons étudiés

Notations	Dosage en Kg/m^3					
	Ciment	Fumée de silice	Eau	SP	Graviers G5/12 + G8/16	Sable de carrière
B₄	485	52	145	12.12	1050	770
B₅	485	52	145	14.55	1050	770
BO	400	-	212,5	-	904	570

SP : Superplastifiant

IV.2.3- Conduite des essais

Nous présenterons dans ce qui suit, les différentes étapes suivies et respectées pour la réalisation des essais sur les différentes compositions retenues.

IV.2.3.1- Malaxage et mise en place

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est un malaxeur à axe vertical planétaire d'une capacité de 125litres.

Les séquences de malaxage suivies sont les suivantes :

- pré-humidification des granulats secs pendant 10 minutes,
- introduction du liant et malaxage pendant 30 secondes des constituants granulaires,
- introduction de l'eau de gâchage (plus une partie des adjuvants), puis malaxage pendant 1 minute et 30 secondes,
- introduction de la partie restante des adjuvants et malaxage pendant 2 minutes,

La mise en place est effectuée dans différents moules destinés aux corps d'épreuve correspondants aux essais programmés.

Les bétons ordinaires ont été mis en place par vibration. Les bétons d'études n'ont subi aucune vibration, ni autre méthode de compaction.



Figure IV.1 : Malaxage du béton

Une forme de corps d'éprouvette ont été coulée pour chacune des compositions : il s'agit de cube (10x10x10) cm³



Figure IV.2 : Corps d'épreuves utilisés

IV.3 – RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce paragraphe, nous étudions successivement les caractérisations mécaniques des compositions retenues à savoir :

- l'évolution de la résistance mécanique dans le temps ;
- l'influence de l'augmentation de la teneur en Superplastifiant sur la résistance mécanique ;
- l'influence du type de mise en place ;

IV.3.1- Performances mécaniques

Les performances mécaniques du béton étudiées sont la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage.

IV.3.1.1- Résistance à la compression

Vingt et un éprouvettes (10x10x10) cm³ (07 pour chaque type des bétons étudiés et 07 pour le BO) sont testées pour chaque échéance d'essai. Les essais d'écrasement ont eu lieu au sein du laboratoire LGCH.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau IV-3.

Tableau IV-3 : Résistance à la compression sur éprouvette (10x10x10)cm³, exprimées en MPa

Paramètres de compositions et résistances à la compression		Bétons		
		BAP-HP ₄	BAP-HP ₅	BO
Teneur en eau (E/C)		0.29	0,29	0.53
Teneur en Superplastifiant		12.12	14.55	-
Résistance à la compression (MPa)	7 jours	63,40	56,20	28.10
	14 jours	69,20	61,37	34.12
	28 jours	71,80	63.50	35.23

L'essai a été conduit sous une vitesse de chargement telle que présentée par la courbe suivante :

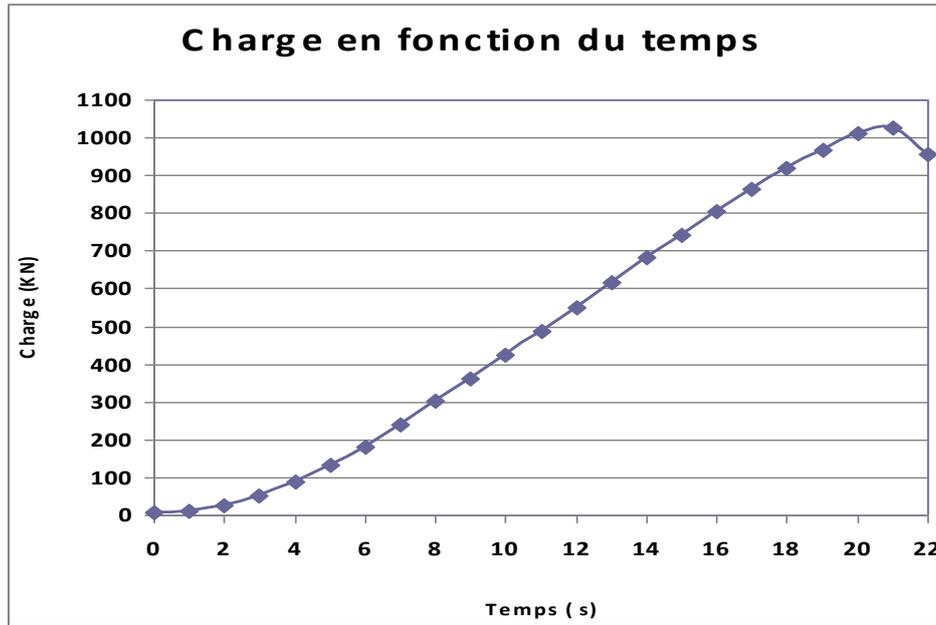


Figure IV.3: Variation de la charge appliquée par la machine dans le temps

A partir des résultats du tableau (IV.3), nous présenterons les différentes influences des paramètres de composition sur la résistance à la compression.

a-Influence de l'âge sur la résistance à la compression

Sur la figure IV-4 les résistances des bétons sont présentées en fonction du temps. En analysant les courbes de cette figure, on peut constater que ces résistances évoluent toutes de manière similaire. Par ailleurs, l'objectif visé, à savoir un BAP-HP à plus de 60 MPa de résistance est bien atteint pour les compositions 4 et 5. En effet, la valeur de la résistance en compression du B₄ et B₅ atteinte au bout de 28 jours s'élève à 71,8 et 63,5 MPa.

Ainsi et à partir des constituants locaux et grâce à une étude minutieuse de la composition, il est possible de formuler des BAP à plus de 60MPa, performance atteinte avec un dosage en liant de 537Kg/m³.

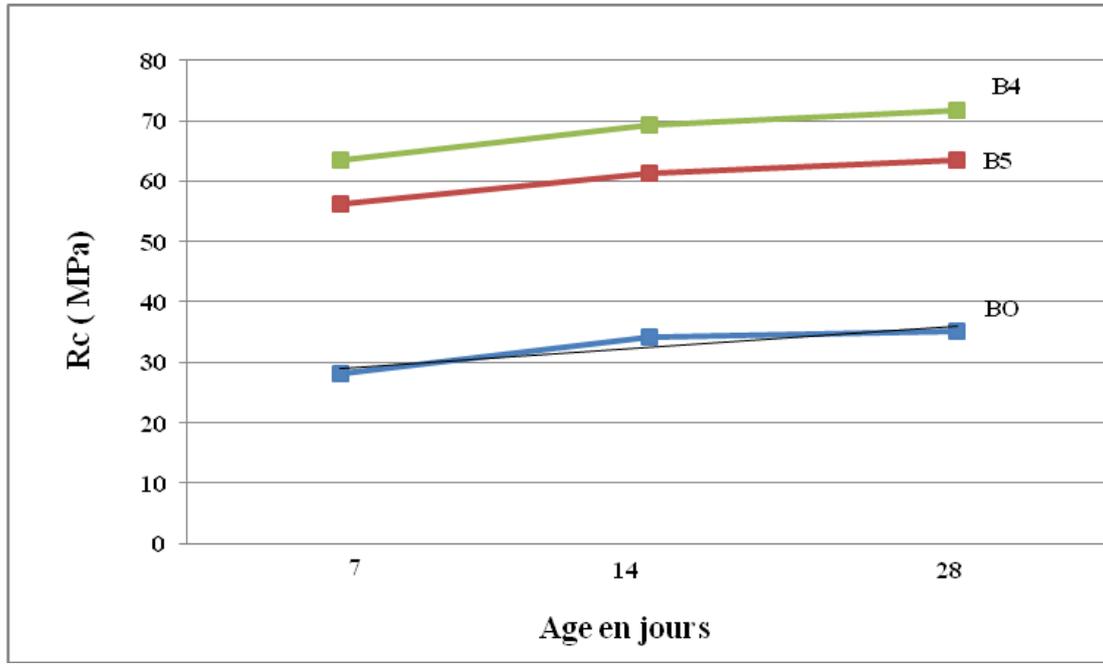


Figure IV-4 : Evolution de la résistance à la compression dans le temps

Pour tester la validité des expressions données par le règlement CBA93 sur l'évolution des résistances dans le temps (représentées à travers deux expressions suivantes), nous avons entrepris un calcul des résistances prévues au bout de 7 et 14 jours à partir de la résistance réelle atteinte au bout de 28 jours,

$$f_{cj} = \frac{j}{4,76 + 0,83j} f_{c28} \quad , \quad \text{si } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa} \quad (IV.1)$$

$$f_{cj} = \frac{j}{1,40 + 0,95j} f_{c28} \quad , \quad \text{si } f_{c28} > 40 \text{ MPa} \quad (IV.2)$$

Tableau IV.4 : comparaison des valeurs de résistances à la compression déduites à partir des expressions du CBA93 (expressions IV.2) avec celles des résistances mesurées

<i>Résistances</i>	<i>Echéances</i>	<i>BAP-HP₄</i>	<i>BAP-HP₅</i>
<i>Résistances réelles (mesurées) (MPa)</i>	7j	63,40	56,20
	14j	69,20	61,37
<i>Résistances déduites de l'expression (IV.2)</i>	7j	62,39	55,18
	14j	68,35	60,45

On peut constater que les valeurs des résistances déduites à partir des expressions du CBA93 faibles que les résistances mesurées. Ainsi l'évolution de la résistance en compression pour les BAP-HP peut être établit par une loi d'évolution intermédiaire entre les deux expressions données par le CBA93.

b-Influence du dosage en Superplastifiant sur la résistance à la compression

Dans le but d'étudier l'influence du dosage en superplastifiant sur les résistances en compression des bétons testées,

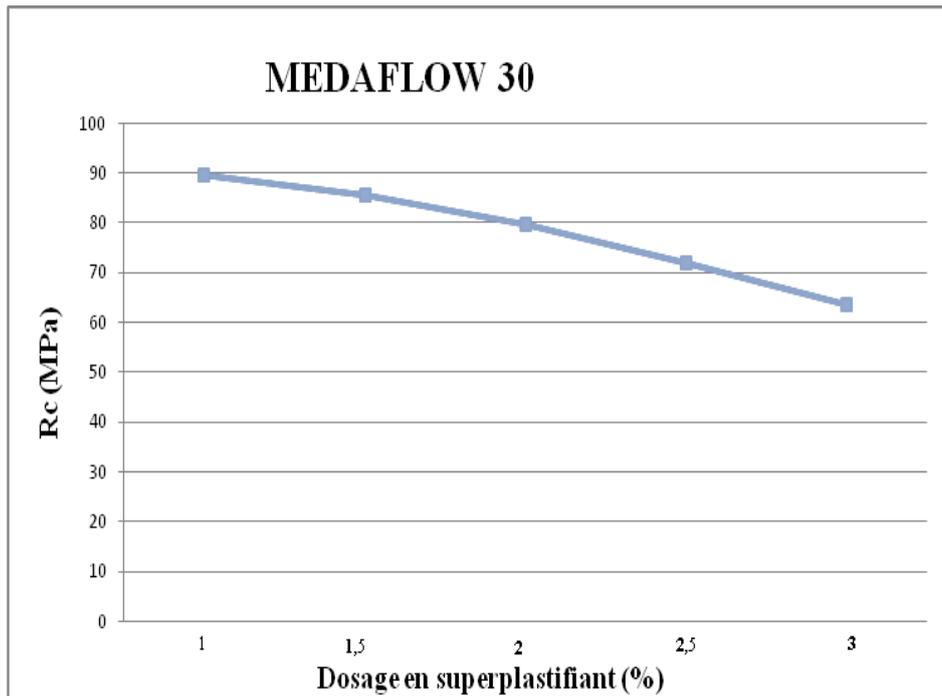


Figure IV-5 : Influence du dosage en superplastifiant sur la résistance en compression

IV.3.1.2- Résistance à la traction

L'essai de traction est effectué sur une éprouvette cubique (10x10x10)cm³ en utilisant un dispositif convenable. Trois éprouvettes pour chaque type de BAP et trois autres pour le BO sont testées pour chaque échéance d'âge.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau IV-5.

Tableau IV-5 : Résistance à la traction, exprimées en MPa

Paramètres de compositions et résistances à la compression		Bétons		
		BAP-HP ₄	BAP-HP ₅	BO
Teneur en Superplastifiant		12.12	14.55	0
Teneur en eau (E/L _{eq})		0,27	0,27	0,53
Résistance à la traction (MPa)	7 jours	4,54	4,05	2,60
	14 jours	4,88	4,44	3,25
	28 jours	4,97	4,52	3,48

Les résultats présentés dans le tableau IV-5 permettent l'étude des influences suivantes.

a-Influence de l'âge sur la résistance à la traction :

La figure (IV-7) montre que la résistance à la traction augmente avec l'âge des éprouvettes et que le béton qui a donné les meilleures performances mécaniques au niveau aussi bien de la compression que la traction est bien le BAP-HP₄ et BAP-HP₅.

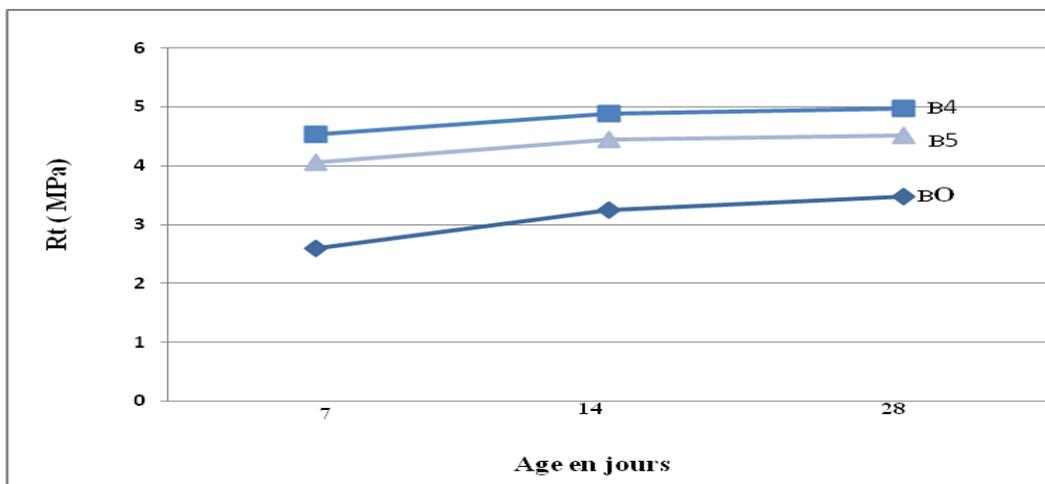


Figure IV-7: Evolution de la résistance à la traction dans le temps

La aussi on constate que la résistance à la traction évolue de manière similaire à celle en compression, avec toujours ces évolutions dans le temps.

Relation entre résistance en compression et en traction

L'article A.2.1.1.2 des règles CBA93 définit une relation conventionnelle reliant la résistance en compression d'un béton à sa résistance en traction. Cette relation est exprimée par l'équation suivante :

$$f_{ij} = 0,6 + 0,06f_{cj} \quad (IV.3)$$

Dans lesquelles les résistances sont exprimées sont MPa.

A partir de cette expression, nous avons reproduit dans le tableau suivant, les valeurs des résistances en traction mesurées ainsi que celles déduites de l'expression précédente.

Tableau IV.6: comparaison des résistances à la traction par fendage mesurées et celles calculées par l'expression IV.3

Désignation du béton		BAP-HP ₄	BAP-HP ₅
Résistance à la traction mesurée (MPa)	7 jours	4,54	4,05
	14 jours	4,88	4,44
	28 jours	4,97	4,52
Résistance à la traction calculée par l'expression IV.3 (MPa)	7 jours	4,40	3,97
	14 jours	4,75	4,28
	28 jours	4,90	4,41

On peut constater que les valeurs des résistances en traction déduites à partir de la relation (IV.3) sont généralement plus faibles que les résistances mesurées. Ainsi donc cette expression sous-estime la résistance réelle des BAP-HP.



Figure IV.8 : Processus de rupture des éprouvettes en compression pour le BAP-HP₅

IV.4- CONCLUSION

Dans le but d'étudier l'effet du dosage en Superplastifiant, une méthode de formulation basée sur l'augmentation de la teneur en superplastifiant à été mise au point. L'influence de ce paramètre de composition sur les propriétés mécaniques des cinq BHP formulés à partir de cette méthode a été étudiée.

Les résultats obtenus montrent que à chaque formulation une réduction dans la résistance mécanique

- *Le dosage en Superplastifiant a une faible influence sur la résistance en compression.*

- *Le mode de mise en place à un faible influence sur la résistance en compression et le module d'élasticité pour des corps d'épreuves à l'échelle des matériaux.*

Chapitre V:

*CONCLUSIONS GÉNÉRALES
ET PERSPECTIVES*

V-CONCLUSIONS GENERALES

Les BHP sont des bétons qui développent des résistances mécaniques élevées du fait de la diminution de la porosité rendue possible grâce à l'ajout de superplastifiant qui diminue la teneur en eau nécessaire à l'obtention d'une maniabilité suffisante. De plus, le spectre du mélange granulaire utilisé est élargi par l'ajout d'éléments ultrafins qui confèrent à l'ensemble une haute compacité. De ce fait, ces bétons présentent une durabilité accrue grâce à une perméabilité réduite aux agents agressifs chimiques extérieurs.

Cependant, malgré les aspects intéressants qu'ils proposent en particulier une résistance mécanique très élevée des BHP, Il faut accorder beaucoup d'importance à la mise en place et à la finition des BHP parce que de tels bétons ne doivent pas être forcément placés et finis de la même façon qu'un béton usuel. Même si les BHP ont en général un affaissement très élevé, il faut absolument prévoir une vibration interne ou externe pour faciliter la mise en place et améliorer la performance et l'apparence des surfaces du béton. Cependant, vu sa très faible teneur en eau, les BHP à l'état frais reste très peu visqueux comparés aux BAP. Malheureusement ces derniers sont caractérisés par d'assez mauvaises propriétés mécaniques à l'état durci.

L'objectif de notre étude était de concilier les propriétés d'un BHP (grande résistance à la compression et la traction, une grande durabilité, etc.) avec les propriétés rhéologiques d'un BAP (fluidité accrue, etc...); c'est-à-dire arriver à formuler un béton autoplaçant à haute performances BAP-HP. Dans ce mémoire, on s'est intéressé spécialement à la formulation, aux propriétés rhéologiques et à la caractérisation mécaniques des bétons Autoplaçant ayant des performances élevées (supérieure à 60MPa) en jouant principalement sur la variation d'un seul paramètre qui est le dosage en superplastifiant.

Les principales conclusions qui ont été tirées de ce travail expérimental sont les suivantes:

- *le dosage en Superplastifiant a une faible influence sur la résistance en compression.*
- *Le mode de mise en place à un faible influence sur la résistance en compression et le module d'élasticité pour des corps d'épreuves à l'échelle des matériaux.*
- *L'ajout d'addition joue un rôle majeur pour les caractéristiques à l'état frais.*

La formulation des bétons à partir des constituants tels que, ciment CPJ42.5, fumée de silice, sables, deux classes de gravier et superfluidifiant, dont nous avons cherchés à établir des compositions répondant aux différentes exigences à l'état frais. Ainsi 2 formules ont pu être mise au point, à savoir une teneur en eau ($E/C=0.29$) et une teneur en Super plastifiant comprise entre 2.5 % et 3%, donnait un BAP –HP ayant une résistance en compression de 72 MPa .

La formulation et la fabrication des bétons Autoplaçant à haute performance (BAP-HP) dont la résistance en compression à 28 jours plus de 60 MPa voir, peut être aujourd'hui de pratique courante en Algérie et ne sera plus du domaine expérimentale vu la disponibilité locale des différents constituants entrant dans leurs compositions.

Perspectives

La formulation des BAP-HP peut être une étape cruciale dans la fabrication de ce genre de bétons ultraperformant, encore faut il chercher si ce béton résiste bien au feu et aux attaques chimiques, ça sera l'étape suivante, si toutes les conditions seront réunis incha Allah.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BARON J. et OLLIVIER J.P « Les Bétons – Bases et données pour leur formulation » Editions Eyrolles, 1996.
- [2] Y.MALIER 1991 Les bétons à hautes performances « Caractérisation,durabilité,application ».
- [3] Association Française de Génie Civil Bétons autoplaçants – « Recommandations provisoires » Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.
- [4] 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.
- [5] Leehmann et 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.
- [6] Walraven J.C. Structural aspect of self-compacting concrete “proceedings of the third international RILEM conference on SCC”, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 15-22
- [7] Projet National BAP Aide à la rédaction de cahier des charges techniques pour le Bétons Auto-Plaçants (BAP)Mars 2005.
- [8] Bétons Autoplaçants-Monographie d’ouvrages en BAP B.52, 2003, collection technique CimBéton, 152 pages. « Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete”, RILEM Publications S.A.R.L, p. 373-384. 1999, Paris,
- [9] Collepari et al Laboratory-tests and field experiences of High-Performance SCCs “Proceedings of the third international RILEM conference on SCC”, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 271-280.
- [10] BILLBERG P. Influence of filler characteristics on SCC rhéology and early hydration “Proceedings of the International Symposium on Self-Compacting Concrete”, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 octobre 2001.

- [11] BUI V. K. and MONTGOMERY D Mixture porportioning method for selfcompacting high performance concrete with minimum paste volume “Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete”, RILEM Publications S.A.R.L, p. 373-384. 1999, Paris,
- [12] SAKATA K Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057-2064, Tronso, GB, 1998.
- [13] JACOBS F. and HUNKELER F.Design of self-compacting concrete for durable concrete structures” Proceedings of First International Symposium on Self-Compacting Concrete, (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 397-407, 13-15 septembre 1999.
- [14] DE LARRARD F., SEDRAN T., HU C., SZITKAR J.C., JOLY M., DERKX F Evolution of the workability of superplasticized concrete: assessment with BTRHEOM rheometer Rilem International Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Rilem proceedings 32, Glasgow, Scotland, pp. 377-388, juin 1996.
- [15] DE LARRARD F Concrete mixture-proportioning - A scientific approach Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON, 1999. Testing and modeling of fresh concrete technology, NIST, 1998,février, NISTIR 6094, 61 pages.
- [16] PERA J., HUSSON S. and GUILHOT B Influence of finely ground limestone on cement hydration Cement and Concrete Composites”, pp. 99-105, 1999.
- [17] GIBBS J.C. and ZHU W Strength of hardened self-compacting concrete Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm”, Suède, pp. 199-209, 13-15 septembre 1999.
- [18] SONEBI M. and BARTOS P.J.M Hardened SCC and its bond with reinforcement Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 septembre 1999.

[19] PERSSON B Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7)", Stockholm, Suède, pp. 239-250, 13-15 septembre 1999

[20] 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 (PRO 33)", Reykjavik, Iceland, pp. 446-456, 17-20 août 2003.

[21] SHI C., WU Y., SHAO Y. and RIEFLER M Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pp. 349-354, 12-13 novembre 2002.

[22] AITCIN P. Le Béton A Haute Performance

[23] NEVILLLE A. M Propriétés des Bétons « Traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris" Eyrolles 2000.

[24] GRAM H. - E., 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 (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 211-225, 13-15 septembre 1999.

[25] Turcry P. Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation Thèse de doctorat de l'Ecole centrale de Nantes, 2004, 213 pages.

[26] HU C. et BARBIERI B Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel Science des matériaux et propriétés des bétons, pp. 265-272, 1^{ère} Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 mars 1998.

[27] PONS G., PROUST E. and ASSIE S Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 août 2003.

- [28] SONEBI M. and BARTOS P.J.M Hardened SCC and its bond with reinforcement Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 septembre 1999.
- [29] 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 (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 227-238, 13-15 septembre 1999.
- [30] HASNI L. Bétons Autoplaçants Rapport de recherche n°98-004/98-006 du CEBTP présenté aux journées du PN BAP, juillet 1999.
- [31] TANGTERMSIRIKULS S., SAKAMOTO J., SHINDOH T. and MATSUOKA Y.H., Evaluation of resistance to segregation of super workable concrete and role of a new type of viscosity agent” Taisei Technical Research Report, pp.369-376, 1991.
- [32] PETERSSON Ö Limestone powder as filler in self-compacting concrete- Frost resistance and compressive strength” Proceedings of the International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 277-284, 23-25 octobre 2001.
- [33] OKAMURA H., OUCHI M. Self-Compacting Concrete”Journal of Advance Concrete Technology, vol. 1, n° 1, 2003, p. 5-15.

Résumé

Les bétons à hautes performances (BHP) sont des bétons qui développent des résistances mécaniques élevées (entre 60 et 80 MPa) du fait de leur faible porosité, leur haute compacité et leur durabilité accrue grâce à une perméabilité réduite aux agents agressifs chimiques extérieurs.

L'objectif de ce travail de recherche est l'amélioration des propriétés rhéologiques du BHP, fabriqués à partir de matériaux locaux, et alliant résistance et ouvrabilité sans modification des performances mécaniques. L'étude du passage d'un BHP à un BHP autoplaçant (BHP-AP), nécessite une bonne connaissance des paramètres de formulation tels que la fraction volumétrique solide ϕ et le rapport Gravieron/Sable. L'étude rhéologique des phases suspendantes du béton a mis en évidence la coexistence ciment fillers – fines – Superplastifiant. Divers essais rhéologiques seront donc réalisés pour identifier les paramètres intrinsèques de ces suspensions. Vingt et une éprouvettes ont été testées pour chaque échéance d'essai. Tous les différents essais ont eu lieu au sein du laboratoire LGCH. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du dosage en superplastifiant peut donner un BAP HP, malgré la différence importante dans la composition de ces deux bétons.

MOTS CLES :

Béton à Hautes Performance, Béton Autoplaçant , Bétons Autoplaçants à Hautes Performances (BAP-HP), Formulations, Performances Mécaniques, Propriétés Rhéologiques, Superplastifiant.

Abstract

High performance concrete (HPC) is a concrete that develop high mechanical strength (between 60 and 80 MPa) to the decrease of porosity made possible thanks to the superplasticizers to reduce water content required for obtaining a sufficient maneuverability. Moreover, the used spectrum of granular mixture is expanded by the addition of ultrafine elements that give the whole a high compacity.

Thus, these concrete do have an increased durability (Mali, 1991) due to a reduced permeability to aggressive chemical field. The objective of this research is to improve the rheological properties of high performance concrete (60 to 80 MPa) without changes in mechanical performance. The study of the transmit stage from HPC to High Performance Self Compacted Concrete HPS-CC (fluidity and ability to transition between frames) in mixture design forms of parameters such as solid volume fraction ϕ and Gravel/Sand ratio. The rheological study of the suspending phases of the concrete showed coexistence cement fillers - fines – superplasticizers. Various rheological tests were made to identify the intrinsic parameters of the suspensions. All tests were performed at the laboratory of Civil Engineering and Hydraulics (LGCH) Although the big difference between the concretes, this experimental work showed that increasing the amount of superplastizer can provide a HPS-CC.

KEYWORDS:

High Performance Concrete (HPC), Concrete (SCC), High Performance Self-Compacted Concrete (HPS-CC), Formulations, Mechanical Performance Rheological Properties, Superplasticizers, Local Constituents.

ملخص

الخرسانات ذات فعالية عالية هي الخرسانات التي تعطينا ارتفاع في القوى الميكانيكية (ما بين 60 MPa و 80 MPa)، نتيجة لانخفاض المسامية بفضل إضافة Superplastifiant للحد من المياه المطلوبة للمحتوى وللحصول على ما يكفي من القدرة الكافية، زيادة على ذلك، طائفة من خليط محبب مستخدم يتم توسيعه عن طريق إضافة عناصر متناهية الصغر وبالتالي فإن هذه الخرسانات تمثل ديمومة زائدة (نتيجة لانخفاض النفاذية في المناطق الخارجية و العدوانية كيميائية).

والهدف من هذا البحث هو تحسين الخصائص الانسيابية للخرسانات فعالية عالية (60 إلى 80 MPa) دون تغيير في القوى الميكانيكية من دراسة المرور من خرسانة فعالية عالية نحو خرسانة ذاتية التوضع ذات فعالية عالية، يتطلب خصائص جيولوجية (السيولة والقدرة على الانتقال بين التسليح) بدلالة تركيبة الخرسانات ، مثل وحدة الحجم الصلبة الجزئي ϕ وتقرير الحصى/الرمال. الدراسة الانسيابية المتعلقة بالمرحلة الخرسانية تعتمد على الإسمنت المواد المساعدة – الحبيبات الرقيقة- superplastifiant. مختلف الاختبارات الانسيابية التي ينبغي إعدادها لتحديد المعايير الأساسية المتعلقة بتقييم مدى تميز المتغيرة الانسيابية واستقرارها. هذا العمل سوف يوفر لنا الظواهر الفيزيائية الأساسية للمحتوى في الظروف العادية للمواد - المادة السائلة و سيقدم لنا فهم أفضل لتغيرات المحتوى وعواقبه.

الكلمات الأساسية:

الخرسانات ذات فعالية عالية (BHP)، الخرسانات ذاتية التوضع (BAP)، الخرسانات ذاتية التوضع ذات فعالية عالية (BAP-HP)، تحضيرات، فعاليات ميكانيكية، خصائص انسيابية Superplastifiant مكونات محلية.

