

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA
BADJI MOKHTAR- ANNABAUNIVERSITY

جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierie
Département : Génie Civil
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Civil
Spécialité : Matériaux de Constructions

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**VALORISATION DES DECHETS INDUSTRIELS DANS LES
BETONS INNOVANTS
CARACTERISATION DES BAP A BASE DES GRANULATS
DE LAITIER : INFLUENCE DE TAUX DE LAITIER GRANULE**

Présenté par : *SAADA Rahma*

Encadrant : *ZEAOULIABOUMAZA Fatiha M.C.B*

Université Badji Mokhtar ANNABA

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Président
KHELIFI Walid	M.C.B	Badji Mokhtar Annaba	Président
ZEAOULIA BOUMAZA Fatiha	M.C.B	Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
BEN KECKEKECHE Ghofrane	M.C.B	Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENT

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma profonde gratitude Madame **BOUMAZA FATIHA**. Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé

Je remercie également **MR KHLIFI WALID** d'avoir présidé le jury de notre soutenance et Mme **BENKECHKECH GHOFRANE** d'avoir examiné notre travail.

Je tiens à remercier aussi mes très chers parents, **Djamel** et **Leila**, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie ma sœur **Rahil**, et mes frères **Abd-Rahmen** et **Siraj**, pour leurs encouragements

Enfin, je remercie mes amis et mes camarades de promotion du génie civil spécialité matériaux qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

SAADA Rahma

REMERCIEMENT

Au nom du dieu ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour mener à réaliser ce travail de recherche.

Je tiens à remercier la directrice du mémoire Dr. BOUMAZA , qui m'a dirigé et suivi tout le long de la réalisation de ce travail. Son assistance précieuse dont elle a fait preuve durant mon encadrement, l'intérêt constant qu'elle a manifestée à l'égard de mon travail, ses conseils, et la confiance qu'elle m'a constamment témoignée, ont été pour moi très motivant.

Mes remerciements les plus vifs vont tout particulièrement à mes parents; Leur soutien moral et matériel m'a été indispensable tout au long de ces années.

Je tiens à remercier les membres du jury pour leur présence, ainsi que pour les conseils qu'ils m'adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer mon travail. Ainsi mes enseignants, espérant que vous allez voir, dans ce manuscrit, les fruits du dévouement avec lequel vous avez fait preuve durant les enseignements que vous nous avez prodigué.

J'adresse également des remerciements à tous les enseignants de département de génie civil, et toute ma gratitude aux personnes qui ont contribué et aidé à la réalisation de ce travail de fin d'étude.

Derardjia Mohamed Nadir

Résumé

Les laitiers du haut fourneau sont longtemps considérés comme des déchets industriels et stockés à l'air libre provoquant de sérieux problèmes environnementaux, aujourd'hui ces déchets sont reconnus comme des véritables matériaux valorisés. Ils sont principalement utilisés comme des granulats dans les travaux publics et ouvrages routiers. Ces produits naturellement cimentaires, peuvent être aussi utilisé comme granulats pour béton de constructions civils et industriels. Le travail présenté dans ce mémoire vise une étude sur l'effet des granulats de laitier (cristallisé et granulé) sur les propriétés des bétons innovant et en particulier les bétons auto plaçant. Les résultats obtenus montrent que la substitution totale ou partielle des granulat naturels par les granulats de laitier (cristallisé comme gravier et granulé comme sable) dans les bétons autoplaçants, entraîne une légère diminution de la fluidité du béton qui est due à la rugosité et à la forte adhérence des granulats, qu'il faudra la rattraper par une augmentation du dosage en addition donc une augmentation de la pâtes qui enrobe les granulats et garantir d'une part le critère d'autoplaçance du béton à l'état frais, et d'autre part, améliorer les résistances à l'état durci , traduisant ainsi l'amélioration de la durabilité.

Abstract

The blast furnace slag has long been considered industrial waste and stored in the open air causing serious environmental problems, today this waste is recognized as true recovered materials. They are mainly used as aggregates in public works and road works. These naturally cementitious products can also be used as aggregates for concrete in civil and industrial constructions. The work presented in this thesis aims at a study on the effect of slag aggregates (crystallized and granulated) on the properties of innovative concretes and in particular self-placing concretes. The results obtained show that the total or partial substitution of natural aggregates by slag aggregates (crystallized as gravel and granulated as sand) in self-placing concretes, leads to a slight decrease in the fluidity of the concrete which is due to the roughness and to the strong adhesion of the aggregates, which will have to be compensated by an increase in the dosage in addition therefore an increase in the paste which coats the aggregates and guarantee on the one hand the criterion of self-placing of the concrete in the fresh state, and of on the other hand, improving the strengths in the hardened state, thus translating the improvement in durability.

ملخص

لطالما اعتبر خبث الفرن العالي نفايات صناعية ويتم تخزينه في الهواء الطلق مما يتسبب في مشاكل بيئية خطيرة ، واليوم يتم التعرف على هذه النفايات على أنها مواد مستردة حقيقية. يتم استخدامها بشكل أساسي كمجموعات في الأشغال العامة وأعمال الطرق. يمكن أيضًا استخدام هذه المنتجات الأسمنتية الطبيعية كمجموعات للخرسانة في الإنشاءات المدنية والصناعية. يهدف العمل المقدم في هذه الأطروحة إلى دراسة تأثير ركام الخبث (المتبلور والحبيبي) على خصائص الخرسانة المبتكرة وخاصة الخرسانة ذاتية الصب. بينت النتائج المتحصل عليها أن الاستبدال الكلي أو الجزئي للرمل الطبيعي بركام الخبث (المتبلور على شكل حصى وجيوب كالرمل) في خرسانة ذاتية الصب ، يؤدي إلى انخفاض طفيف في سيولة الخرسانة نتيجة الخشونة و الالتصاق القوي للركام ، والذي يجب تعويضه عن طريق زيادة الجرعة بالإضافة إلى زيادة العجينة التي تغلف الركام وتضمن من ناحية معيار الصب الذاتي للخرسانة في حالة جديدة ، ومن ناحية أخرى ، تحسين نقاط القوة في الحالة الصلبة ، وبالتالي ترجمة التحسن في المتانة

SOMMAIRE

Résumé.....	04
Abstract.....	05
تلخيص.....	06
Sommaire.....	07
Liste des tableaux.....	10
Liste des figures.....	12
Introduction général.....	13
Chapitre I : Etude bibliographique	
I.1 INTRODUCTION.....	16
I.1.1 Qu'est-ce qu'un béton autoplaçant ?.....	16
I.2. HISTORIQUE DE BETON AUTOPLACANT.....	17
I.3 CONSTITUANTS D'UN BETON AUTOPLACANT.....	17
I.3. 1 Ciment.....	17
I.3.2. Les granulats.....	18
I. 3.2.1. Les granulats fins.....	18
➤ Le sable roulé (sable de dune)	
➤ Le sable concassé (sable de carrière)	
➤ Le laitier de haut-fourneau granulé	
I.3.2.2 Les gros granulats.....	18
➤ Les graviers naturels	
• Les graviers roulés	
• Les graviers concassés	
➤ Les graviers artificiels	
• Le laitier de haut-fourneau cristallisé	
I.3.2.3 L'eau.....	21
I.3.2.4 Le superplastifiant.....	21
I.3.2.5 L'agent colloïdal ou de viscosité.....	22
I.3.2.6. Additions minérales.....	22
➤ Fillers calcaire.....	
I.4. EFFETS DES ADDITIONS FINES.....	23
I.4.1. Effets physiques et chimiques des additions.....	23
I.4.2. Effet rhéologique du filler calcaire et du laitier granulé sur les BAP.....	24
I.5. EFFETS DE LAITIER GRANULE COMME SABLE.....	25
I.6. CARACTERISATION D'UN BETON AUTOPLACANT.....	25
I.6.1 Caractéristiques à l'état frais.....	25
I.6.1.1 Essais sur béton frais.....	27
I.6.2 Caractéristiques à l'état durci.....	31
I.7. DIFFERENTES TYPES DE FORMULATION DES BAP (METHODES).....	34
I.8. LES AVANTAGES ET LES INCOVENIENTS D'UN BAP.....	36
I.8.1 Avantages d'un BAP.....	36
I.8.2 Les inconvénients.....	37
I.9. MISE EN ŒUVRE.....	37
I.10. LES DOMAINES D'UTILISATION DE BETON AUTOPLACANT.....	38
I.11. CONCLUSION.....	42

CHAPITRE II :CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION	44
II.1 INTRODUCTION.....	45
II.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISE.....	45
II.2.1 Le ciment.....	45
II.2.2 L'eau.....	46
II.2.3 Squelette granulaire.....	47
II.2.3.1 Le sable	47
➤ La masse volumique apparente du sable siliceux et du laitier granulé	
➤ La masse volumique absolue (ρ)	
➤ Equivalent de sable : Norme [NF18-598]	
➤ Analyse granulométriques : Norme [NFP18-304]	
II.2.3.2 Les scories	55
➤ Masse volumique absolue de laitier cristallisé 3/8 et laitier cristallisé 5/16	
➤ Absorption d'eau	
➤ Analyse granulométrique de laitier cristallisé 3/8	
➤ Analyse granulométrique de laitier cristallisé 5/16	
II.2.4 Additions minérales	59
II.2.4.1 les fillers calcaire	59
II.2.4.2 Super plastifiant.....	59
II.3.METHODE DE FORMULATION	60
II.4.CONCLUSION	62
ChapitreIII:METHODES EXPERIMENTALES	63
III.1 INTRODUCTION	64
III.2. CALCULS DE LA COMPOSITION DES BETONS.....	64
III.2.1. Béton de référence BAPR (BAP TEMOINS)	64
III.2.2. Béton d'étude (BAP)	66
III.2.2.1 COMPOSITION BAP 1 (25% laitier granulé et 75% sable siliceux).....	67
III.2.2.2 COMPOSITION BAP 2 (50% laitier granulé et 50% sable siliceux)	68
III.2.2.3 COMPOSITION BAP 3 (75% laitier granulé et 25% sable siliceux).....	69
III.2.2.4 COMPOSITION BAP 4 (100% laitier granulé)	70
III.3.PREPARATION DES MELANGES	72
III.4.ESSAIS DE CARACTERISTIQUE DU BETON AUTOPLACANTS A L'ETAT FRAIS	72
III.4.1 ESSAI D'ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS [NFEN12 350_8]	73
III.4.2ESSAI DE LA BOITE EN L [NF EN 12 350-10]	74
III.4.3ESSAI DE STABILITE AU TAMIS	76
III.5. LA MASSE VOLUMIQUE DU BETON AUTOPLACANT	77
III.6.ESSAI DE CARACTERISATIONS DU BETON AUTOPLACANT A L'ETAT DURCI	77
III.6.1. ESSAI MECANIQUE.....	77
III.6.1.1 ESSAI DE COMPRESSION.....	77
III.6.1.2 : ESSAI DE TRACTION PAR FENDAGE.....	78
III.7 : CONCLUSION	79
CHAPITRE IV : RESULTATS ET ANALYSES	
IV.1 INTRODUCTION.....	81

IV.2 CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS.....	81
IV.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow).....	81
Dosage en addition de fillers calcaire.....	82
IV.2.2. Essai du T ₅₀₀	82
IV.2.3 Essai de la boîte en L (LBOX).....	83
IV.2.4 Essai de stabilité au tamis.....	84
IV.2.5 Masse volumique des béton frais.....	84
IV.3 CARACT2RISATION DES BAP A L'ETAT DURCI.....	85
IV.3.1 Résistance à la compression.....	85
IV.3.2 Résistance à la traction par fendage.....	87
IV.3.3 Vérification de l'absence de ségrégation.....	88
IV.4 CONCLUSION.....	89
CONCLUSION GENERALE	91
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	94
ANNEXE.....	100

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 Critère de stabilité.....	29
--	----

Chapitre II

Tableau II. 1 : Compositions chimiques du ciment	42
Tableau II. 2 : Compositions minéralogiques du clinker	42
Tableau II. 3 : Caractéristiques physiques du ciment	43
Tableau II. 4 : Les pourcentages des éléments majeurs et mineurs	44
Tableau II .5 : composition chimique de laitier granulé en%.....	44
TableauII.6 : Résultats de la masse volumique apparente du laitier granulé.....	45
Tableau II 7 : Résultats de la masse volumique absolue du laitier granulé.....	46
Tableau II .8 : Résultats de la masse volumique absolue du sable siliceux.....	46
Tableau II. 9 : Résultat de l'équivalent de sable siliceux.....	47
Tableau II .10 : résultats de l'analyse granulométrique de sable siliceux 1.....	48
Tableau II. 11 :Sable siliceux 2.....	49
TableauII. 12 :résultats Laitier granulé (0/2)	50
TableauII. 13 :résultats Laitier granulé (0/3.15)	50
TableauII. 14 :résultats Laitier granulé (0/2)	51
TableauII. 15 :résultats (50%Laitier granulé 0/3.15 ,50%Sable siliceux)	51
TableauII. 16 :résultats (75%Laitier granulé 0/3.15 ,25%Sable siliceux)	52
TableauII. 17 :Composition chimique élémentaire de la scorie.....	52
TableauII.18 : Résultats des mesures de la masse volumique apparente du laitier cristallisé 3/8..	53
TableauII. 19 : Résultats des mesures de la masse volumique apparente du laitier cristallisé 5/16...	53
TableauII. 20 : Laitier cristallisé 3/8.....	53
TableauII. 21 :Laitier cristallisé 5/16.....	54
TableauII. 22 :Absorption d'eau des graviers laitier cristallisé 3/8.....	54
Tableau II .23 :Absorption d'eau des graviers laitier cristallisé 5/16.....	54
TableauII.24 :resultat de l'analyse granulométrique de laitier cristallisé 3/8.....	54

Tableau II. 25: résultat de l'analyse granulométrique de laitier cristallisé 5/16...	55
Tableau II. 26: Composition chimique et Caractéristique chimique des fillers calcaires.....	56
Chapitre III	
Tableau III. 1 : composition de BAPR.....	61
Tableau III. 2 : Différentes composition utilisées dans la recherche	62
Tableau III. 3 : Optimisation du dosage en fillers calcaire.....	63
Tableau III. 4 : Récapitule les compositions des BAPR d'étude retenues.....	64
Tableau III.5 : Récapitule des résultats des méthodes expérimentales	77

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Formulation qualitative du BAP (d'après [Okamura, 2003]).....	18
Figure I.2 : Coupe d'un haut- fourneau.....	20
Figure I.3: Refroidissement lent du laitier cristallisé.....	21
Figure I.4 : Influence de la porosité du laitier cristallisé sur sa résistance à la compression.....	21
Figure I.5 : Illustration de l'effet filler.....	24
Figure 1.6 : Dispositifs expérimentaux.....	26
Figure I.7 : Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	28
Figure I.8 : Entonnoir (V-Funnel).....	29
Figure I.9 : Entonnoir (O-Funnel).....	29
Figure. I.10 : La boîte en L.....	29
Figure I.11 : Essai de stabilité au tamis.....	30
Figure 1.12 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant.....	31
Figure 1.13 – Résistance mécanique d'un béton vibré et de 2 BAP.....	31
Figure 1.14 : Comparaison des modules d'elasticité d'après les codes de construction de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales.....	32
Figure1.15 : Le pont Akashi Khaikyo.....	38
Figure1.16 : La tour Landmark Tower.....	38
Figure1.17 : Béton autoplaçant pour la réalisation d'ouvrages techniquement complexes.....	39
Figure1.18 : Béton autoplaçant renforcé de fibres haute performances pour la réalisation de planchers en dalles de compression sur poutrelles-hourdis.....	39
Figure1.19 : Béton autoplaçant pour la réalisation des dallages sur terre-plein.....	39
Figure I.20 : Béton autoplaçant pour la réalisation de voiles , de poteaux et de poutres apparents.....	40
Figure1.21 : Béton autoplaçant pour la réalisation de voiles , de poteaux et de poutres courants.....	40

Figure1.22 : Béton autoplaçant pour la réalisation de plancher en dalles pleines ou dalles de compression sur poutrelles-hourdis.....	40
Figure1.23 : Béton autoplaçant pour ouvrages en milieux agressifs.....	41

Chapitre II

Figure II. 1 : Mesure de la masse volumique apparente du laitier granulé.....	45
FigureII . 2 : Mesure de la masse volumique absolue du laitier granulé et sable siliceux.....	46
Figure II .3 : Mesure de la propreté du sable.....	48
Figure II.4 : Procédé utilisé pour déterminer de la masse apparente du laitier cristallisé (3/8 et 5/16).....	54

Chapitre III

Figure III.1 : Courbes granulométriques de composition de BAPR.....	62
Figure III.2 : méthode graphique de composition des granulats (composition BAP 1)	65
Figure III.3 : méthode graphique de composition des granulats (composition BAP 2)	66
Figure III.4 : méthode graphique de composition des granulats (composition BAP 3)	67
Figure III.5 : méthode graphique de composition des granulats (composition BAP 4)	68
Figure III.6 : Etalement d'un BAP homogène , bonne répartition granulaire.....	71
Figure III.7 : Boîte en L.....	71
Figure III.8 : Essai à la boîte en L.....	72
Figure III.9 : Essai de stabilité au tamis pendant les deux minutes d'attente.....	73
Figure III.10 : Essai de compression.....	74
Figure III.11 : Essai traction par fendage.....	75

Chapitre IV

Figure IV-1. Influence du dosage en laitier granulé sur l'étalement.....	77
Figure IV-2 :Influence taux de sable de laitier granulé sur le dosage en addition.....	78
Figure IV-2 :Influence taux de sable de laitier granulé sur le dosage en addition	78
Figure IV_3 : Influence taux de laitier granulé sur le temps d'écoulement T 500.....	79
Figure IV.4 :Influence du dosage en laitier granulé sur l'écoulement.....	79
Figure IV.5 : Influence du dosage en laitier granulé sur la stabilité au tamis.....	80
Figure IV.6 : Influence du dosage en laitier granulé sur la masse volumique.....	81
Figure IV.7 :influence de sable de laitier sur résistance à la compression à 7 jours...	82
Figure IV.8 :influence de sable de laitier sur résistance à la compression à 14 jours..	82
Figure IV.9 :influence de sable de laitier granulé sur résistance à la compression 28 jours	83
Figure IV.10. Cinétique de durcissement des différents BAP.....	83
Figure IV.11 :influence de sable de laitier granulé sur résistance à la traction28 jours	84
FigureIV.12 : Observation de la répartition granulaire du BAP	85



**INTRODUCTION
GENERALE**

INTRODUCTION GENERAL

L'utilisation de plus en plus croissante de l'acier génère une quantité considérable de laitiers qu'il faut valoriser. Au début du développement à l'échelle industrielle de cette filière, le laitier de haut fourneau était considéré comme un déchet destiné à être stocké en terrils. Dès les années 1980, le laitier D'EL HADJAR était partiellement valorisé, le niveau de valorisation varie fortement selon le type de laitier considéré. Aujourd'hui les laitiers de haut fourneau (LHF) sont presque entièrement valorisés, ils sont utilisés comme granulats pour béton et en construction routière lorsqu'ils sont cristallisés, ainsi que comme additions minérales ou liants hydrauliques routiers lorsqu'ils sont vitrifiés. Les laitiers de haut fourneau vitrifiés interviennent également dans la fabrication du ciment CEM II et CEM III en remplacement du clinker

Néanmoins la valorisation de ces déchets industriel dans les bétons innovants reste encore insuffisante et limitée à des fines comme addition pour les bétons autoplaçants, bétons largement utilisés dans le monde, ainsi qu'en Algérie. Ces bétons sont spéciaux, et se distinguent par rapport aux autres bétons par leurs comportements à l'état frais (grande fluidité).

Ces bétons connaissent un essor important, car ils présentent deux intérêts technico-économiques majeurs :

- Une diminution du temps lors de la mise en place du béton en chantier. Cela est d'autant plus important qu'elle devient de plus en plus coûteuse et génératrice de délais étant donné la complexité sans cesse croissante des coffrages (forme, ferrailage...)
- L'obtention d'une meilleure qualité du béton in-situ. Pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation. Cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'autoplaçants que si le matériau final présente des propriétés homogènes, c'est-à-dire s'il n'a pas subi de ségrégation.

C'est pourquoi, notre travail vise une étude sur la formulation de ce type de béton en utilisant le sous-produit d'El-Hadjar comme granulats (sable et gravier), et apporter une contribution à la valorisation de ces déchets industriels, et voir leurs influences sur le comportement à l'état frais et à l'état durci.

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur les BAP en général, ses propriétés, ses avantages, et ces constituants, les différentes méthodes élaborées pour sa formulation et les différentes techniques permettant sa caractérisation.

Le deuxième chapitre traite la caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude aussi bien des matières premières qui sont utilisées dans ce travail et qui en fait l'objet de

recherche, en particulier les granulats (cristallisé et granulé) ainsi qu'un exposé détaillé rappelle la méthode de formulation de Dreux appliquée au béton ordinaire et qui sera adaptée au BAP

Le troisième chapitre est consacré à la formulation des bétons de référence et d'étude en détail chaque dosage de substitution de sable de dune par le laitier granulé (25%, 50%, 75% et % 100), en déduisant les différents modules de finesse.

Dans le troisième chapitre, une formulation des bétons de référence et d'étude est détaillée en utilisant la méthode de Dreux Gorisse.

Le chapitre quatre est consacré à la caractérisation et l'étude de l'effets de sable de laitier granulé sur les bétons autoplaçants (BAP). La caractérisation des BAP à l'état frais a été réalisée par trois principaux essais conformément aux critères énoncés par la norme EN 206-1. Les résultats obtenus sur béton à l'état frais et à l'état durci montrent que, la substitution des granulats naturel (gravier de la roche calcaire et sable siliceux) par les granulats artificiel (laitiers cristallisé et granulé) peut donner non seulement des bétons à caractère autoplaçant mais aussi des bétons à des performance mécanique élevées que ce soit à long terme et moyen terme.

Ce travail est finalisé par un une conclusion générale.



Chapitre I :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 INTRODUCTION :

1.1. Qu'est-ce qu'un béton Autoplaçant ?

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés à priori contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité). L'Association Française de Génie-Civil définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons « très fluides, homogènes et stable » [1].

C'est un béton qui s'écoule et se compacte par le seul effet gravitaire, capable de remplir le coffrage avec son ferrailage ses grains, réservations etc..., tout en conservant son homogénéité [2]

Au japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieur pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autoplaçants « Selfcompacting concrete », traduit par béton auto plaçant ou béton auto nivelant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier [3].

Les bétons auto-plaçant « BAP » se distinguent donc des bétons dits ordinaires « BO », ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique) [3 - 4].

Pour parvenir à ce cahier de charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (**Figure 01**).

En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie. [3][5]

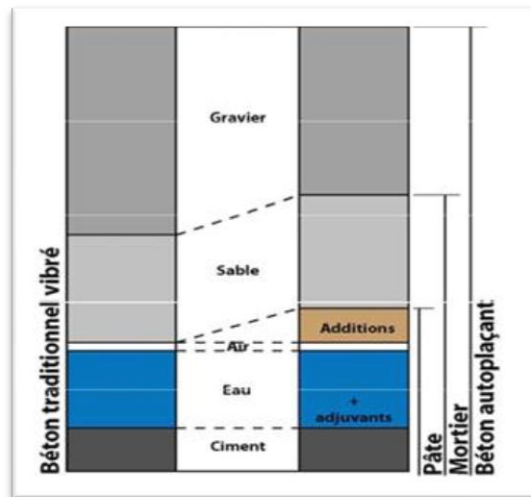


Figure I.1 : Formulation qualitative du BAP (d'après [Okamura, 2003])

I.2 HISTORIQUE DE BETON AUTOPLACANT :

Les chercheurs K. OZAWA ET K. MAEKAWA de Université de Kochi (Tokyo) ont développé le premier prototype de BAP pendant l'été de 1988. Ces résultats ont été présentés par K. OZAWA pour la première fois au 2^{ème} Congrès de l'Asie de l'Est et Pacifique sur le Génie Civil et la Construction, tenu en Janvier 1989 à Chiangmai(Thaïlande). Trois années plus tard, en Mai 1992 au 4^{ème}, Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention d'Ozawa a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton [6].

I.3 CONSTITUANTS D'UN BETON AUTOPLACANT :

La formulation des bétons auto-plaçant se distingue de celle des bétons ordinaires par une présence plus importante de volume de pâte (pâte = ciment + fines + eau + adjuvants), de manière à améliorer la fluidité du béton en évitant l'effet de voûte entre les gros granulats.

I.3.1 Le Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique indispensable, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à $1450C^0$, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20% [7].

Le clinker est constitué de quatre minéraux : le silicate tricalcique, le silicate bicalcique, l'aluminate tricalcique, l'aluminoferrite tetracalcique.

I.3.2 Les Granulats :

I. 3.2.1. Les granulats fins :

➤ Le sable roulé (sable de dune)

Les sables sont classés selon leur granulométrie (la grosseur des grains) [8]

- Sable fin, de 0.03 à 0.315mm
- Sable moyen de 0.315 à 2mm
- Sable gros de 2 à 5mm

➤ Les sables concassés (Sable de carrière)

Obtenu par la réduction de gravier en granulats fins concassé ou plus simplement le déchet d'abatage et de concassage des roches pour l'obtention du gravier, les poussières de concassage dues à cette opération ne peuvent pas être éliminées, mais ne doivent pas être présent en quantité excessive ce qui augmente la demande en eau d'humidification, en plus, ils peuvent gêner la liaison pate-granulats.

Les granulats fins concassés foisonnent beaucoup plus qu'un sable naturel à cause de leur teneur en fine. S'il contient de l'argile qui enrobe les grains de sable et les empêche d'adhérer aux liants, il est donc à proscrire.

➤ Le laitier de haut-fourneau granulé :

Dans le processus de fabrication de la fonte, on utilise des minerais de fer qui, outre leur phase ferreuse, contiennent des minéraux voisins de ceux du cru de clinker. La fusion des minerais dans les hauts fourneaux provoque alors la séparation gravitaire de la fonte liquide(en partie inférieure) et d'un résidu surnageant, également liquide appelé laitier en raison de sa couleur claire (lorsqu'il est à température ambiante).

I.3.2.2 Les gros granulats

Les granulats utilisés pour le béton peuvent être d'origine naturelle ou artificielle.

➤ Les graviers naturels

- Les graviers roulés

Les graviers roulés sont de grains de roche non concassés, de 3 à 22mm de diamètre, les graviers roulés sont extraits des gravières des alluvions, Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico – calcaires.

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Les graviers concassés**

Les graviers concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage ... sont obtenue par abatage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Ce type de granulats prouve une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. Les graviers concassés se maintiennent entre eux et assurent une excellente stabilité de l'ouvrage.

- **Les graviers artificiels**

- **Le laitier de haut-fourneau cristallisé**

La première étape dans la production d'acier est l'obtention de fonte. Le fer (Fe) est naturellement contenu dans le minerai de fer, dont la teneur en oxydes peut atteindre 60%. Ce minerai, combiné à du coke comme combustible et à de la chaux comme fondant, est alimenté dans un haut-fourneau (figure I.2), sorte de grand four vertical dans la partie basse duquel sont soufflés de larges volumes d'air chaud. Ce procès fonctionne en continu, la colonne de matières brutes descendant au fur et à mesure que le fer est extrait du minerai et s'accumule au fond du haut-fourneau, recouvert par une couche de laitier plus léger. Ce laitier est une roche liquide (1500°C environ) composée des parties non métalliques du minerai à la chaux. Le fer (sous forme de fonte) et le laitier, tous les deux en fusion, sont périodiquement sous-tirés du haut-fourneau. Chaque tonne de fonte génère de l'ordre de 250 à 300 kg de laitier.

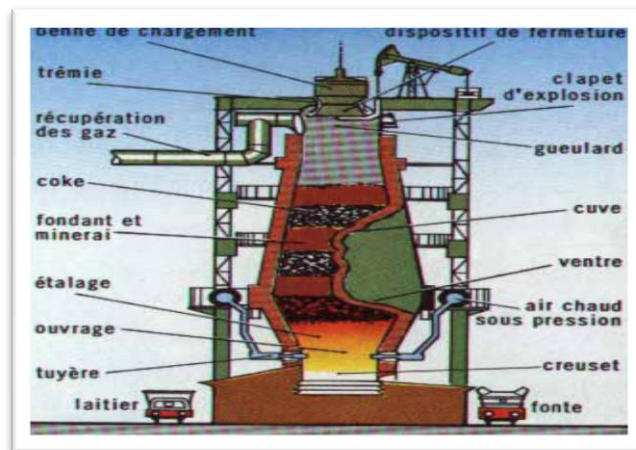


Figure I.2 : Coupe d'un haut- fourneau.

Après séparation d'avec la fonte, plus lourde, le laitier de haut fourneau est dirigé par une rigole vers des fosses où il va refroidir à l'air et se cristalliser sous forme de roche (figure I.3). Après le début de la solidification, le laitier est arrosé afin d'en abaisser la température et de le fragmenter. On obtient ainsi du laitier cristallisé brut, qui peut alors être concassé et criblé (comme dans une carrière) pour produire des granulats.



Figure I.3: Refroidissement lent du laitier cristallisé.

Schématiquement le laitier cristallisé est considéré comme un mélange des quatre oxydes : silice SiO_2 ; chaux CaO ; alumine Al_2O_3 ; magnésie MgO pour 95% à 98% de sa composition, le complément étant constitué par des oxydes secondaires et des composés sulfurés. Et d'un point de vue minéralogique ses constituants cristallisés sont essentiellement des silicates et silico-aluminates de calcium [9].

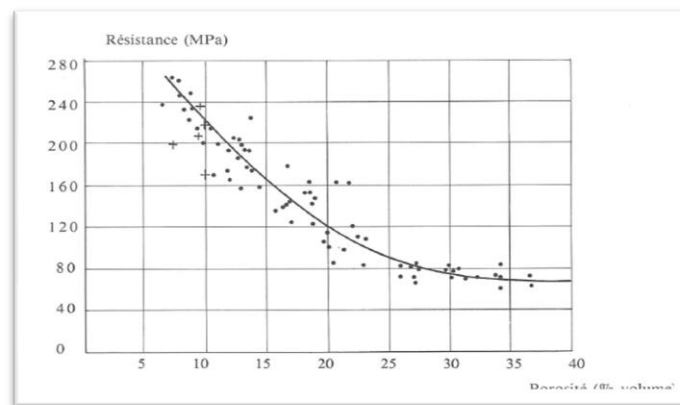


Figure I.4 : Influence de la porosité du laitier cristallisé sur sa résistance à la compression[31]

La résistance mécanique d'un laitier cristallisé sera fonction de la nature de constituants minéraux ; de la dimension des cristaux ; et de leur imbrication (condition de refroidissement) et leur dureté.

La résistance à la compression simple sur cubes de laitier cristallisé est habituellement comprise entre 130 et 180Mpa. L'immersion est sans effet sur les résistances, cette résistance reste toujours relativement importante à la porosité élevée (figure I.4). Les granulats de laitier cristallisé sont utilisés notamment dans les bétons routiers ou pour les bétons réfractaires [10].

I.3.2.3 L'eau

L'eau de gâchage qui entre dans la réaction chimique de liant pour former les hydrates, elle doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [11] :

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de super plastifiants.

I.3.2.4 Le superplastifiant

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2 % environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Le béton est un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d'eau et ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d'eau introduite lors du gâchage. L'utilisation de superplastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation [12].

Les superplastifiants permettent de répondre à deux types d'applications, selon que l'utilisateur travaille dans le domaine de la préfabrication ou du béton prêt à l'emploi. Dans le premier cas, il aura besoin d'un béton qui acquiert des propriétés mécaniques importantes de façon très rapide afin de procéder au démoulage dans les délais les plus brefs et en même temps d'un béton assez fluide pour avoir une mise en place convenable dans les moules. Dans le deuxième type d'utilisation, le béton devra pouvoir être transporté sur des parcours plus ou moins longs et présenter de bonnes propriétés de mise en œuvre sur le site de construction sans que les performances mécaniques ne soient affectées.

Il apparaît donc que les bétons modernes doivent satisfaire à la fois aux exigences de résistance et de maniabilité. Il s'agit de deux caractéristiques apparemment inconciliables puisque sans l'ajout de superplastifiant, l'augmentation des résistances ne s'obtient qu'avec une réduction d'eau. Or, une réduction d'eau diminue la fluidité. Un gain de maniabilité ne peut être obtenu qu'en augmentant la quantité d'eau de gâchage et donc au détriment des résistances finales du matériau.

I.3.2.5.L'agent colloïdal ou de viscosité

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

L'utilisation d'agents de viscosité a pour but de stabiliser le béton en fixant l'eau dans le mélange, ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion au béton. Ces produits sont à la base de longues molécules polymères (polysaccharides) ou de

dérivées cellulosiques. Ils se présentent généralement sous forme de poudre. L'intérêt de leur utilisation est parfois discuté du point de vue de leurs conséquences sur la rhéologie. Toutefois, il est démontré [13] qu'ils permettent, dans le contexte de la production industrielle, de diminuer la sensibilité des bétons autoplaçants aux variations de teneur en eau.

I.3.2.6. Additions minérales

Un BAP doit contenir un certain volume de fines, en particulier pour assurer sa stabilité à l'état frais vis-à-vis de la ségrégation et des variations d'eau. Quand ce volume est occupé intégralement par du ciment portland, il fournit au matériau durci, un niveau de performance excessif par rapport aux spécifications, il est naturel de l'occuper en partie avec des matériaux fins, moins réactifs que le clinker mais d'un coût inférieur, notamment sur les plans énergétiques et environnementaux. Ces additions minérales peuvent être mélangées au ciment lors de sa fabrication (ciments composés) ou ajoutées directement dans le malaxeur à béton.

On passe en revue dans cette partie les additions minérales les plus couramment utilisées dans les BAP [14].

➤ **Fillers calcaires**

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Parmi ces caractéristiques, deux sont particulièrement significatives :

-une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomite) ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium CaCO_3 ,

- Une valeur minimale de l'indice d'activité.
- Les dimensions des particules de fillers s'étendent de quelques μm à quelques dizaines de μm , déterminées en utilisant la granulométrie laser.

I.4. EFFETS DES ADDITIONS FINES

I.4.1. Effets physiques et chimiques des additions

➤ **Effet Filler ou effet de remplissage**

Une addition minérale [15] incorporée dans un mortier ou un béton modifie le squelette granulaire du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie du volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliorant. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente, cet accroissement de la résistance est appelé « effet filler ».

➤ **Effet chimique ou pouzzolanique**

L'activité chimique est le résultat de réactions chimiques entre une ou plusieurs phases du ciment et l'addition minérale. Par exemple les cendres volantes donnent lieu à la réaction pouzzolanique. La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumée de silice ou laitier de haut fourneau, la portlandite est produite par l'hydratation du ciment. La réaction pouzzolanique est une réaction qui ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau. L'accroissement de résistance qu'elle provoque prend toute son ampleur

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

pour les longues échéances, dans la mesure où elle a aussi besoin d'hydroxyde de calcium, (hydrate sous produit de la formation du CSH du clinker).

➤ Effet physique ou de surface

L'incorporation dans les liants hydrauliques d'une addition minérale, même inerte est favorable au développement de la résistance à court terme. Cet effet est observé par de nombreux auteurs, aussi bien sur des pâtes de ciment que des mortiers. Sans que les processus mis en jeu soient clairement précisés et quantifiés, l'action de l'addition est généralement désignée sous le terme de germination hétérogène. Les hydrates nouvellement formés par l'hydratation du ciment pourraient se précipiter en partie sur les surfaces minérales offertes par l'addition. En conséquence la couche d'hydrate qui se forme autour d'un grain de ciment anhydre, présente une épaisseur réduite ; l'hydratation du cœur anhydre, régie par des phénomènes de diffusion, est alors facilitée.

L'addition minérale entraîne donc une meilleure hydratation du ciment à un instant donné. Ce processus d'hydratation différentielle entraîne une apparente accélération d'hydratation la germination hétérogène reposant sur des phénomènes de surface, il est donc logique que la résistance des mortiers augmente avec l'augmentation de la finesse des additions, mais en fait, plus que la surface spécifique, c'est vraisemblablement le nombre de particules d'addition par unité de volume de pâte qui est le paramètre essentiel de ce phénomène.

I.4.2.Effet rhéologique du filler calcaire et du laitier granulé sur les BAP

➤ Effet des fillers calcaires

Neto et Campitelli [16] utilisent le « tow-points » test pour caractériser la rhéologie de la pâte de ciment qui contient du filler calcaire. Ils observent la réduction du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire, et aussi l'augmentation de la viscosité plastique au-delà d'une certaine valeur de la finesse du calcaire (**figure I.5**).

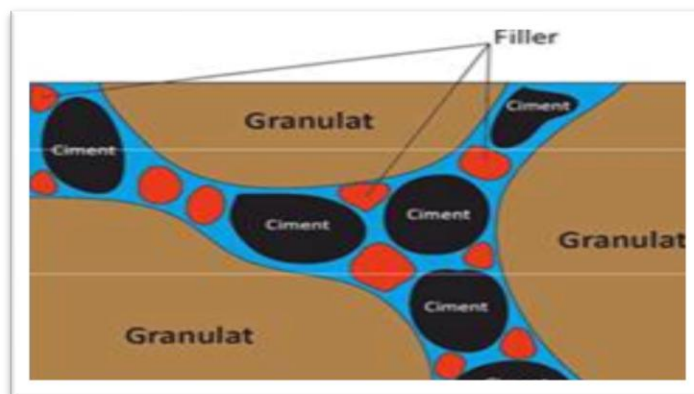


Figure I.5 : Illustration de l'effet filler.

Notons que les auteurs ne précisent pas la valeur limite de la finesse du calcaire pour que les résultats soient observés.

Brookbans, a étudié l'effet de l'addition de 5 à 28% de poudre calcaire au ciment sur les propriétés du béton frais. Il a observé que le temps de prise est réduit quand on augmente le taux de fillers et que ces derniers réduisent beaucoup la quantité d'eau et probablement n'ont

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

pas un effet d'entraîneur d'air. A. Ghezal [17], a formulé deux bétons autoplacants avec différents pourcentages en fumée de silice et de fillers calcaires dont la dimension des particules est de l'ordre de 3 μm et un ciment portland. Les auteurs ont constaté que les deux bétons présentent des paramètres rhéologiques acceptables mesurés avec le rhéomètre IBB (rhéomètre utilisé à l'université de Sherbrooke), et les valeurs de la capacité de remplissage mesurées avec l'essai du caisson sont très satisfaisantes.

Ogawa et coll. (1995) ont développé des formulations de bétons fluides (Détal = $650 \pm 30\text{mm}$) qui présentent de faibles pertes d'étalement au cours du temps (maximum 30mm après 60 min.). Ces bétons de rapports E/C = $0,55 \pm 5\%$, contiennent du filler calcaire, un volume de la pâte supérieur à 300L, des granulats concassés de diamètre maximum 20mm, un rapport volumique de Sable / Granulats de $51 \pm 1\%$, 8 kg/m³ de superplastifiant (Naphtalène) et 3 kg/m³ d'agent colloïdal à base de polyacrylate. Ils ont trouvé que pour un remplacement de 20% du volume des granulats par le filler calcaire, on obtient les meilleures fluidités. De même qu'ils ont obtenus de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage.

Les mêmes bétons ont été étudiés vis à vis du retrait suivant la norme (JIS A1129) à une température de 20°C et une humidité relative de 60%. On constate que les bétons contenant des agents expansifs, des réducteurs de retrait et du filler calcaire, présentent une réduction très significative du retrait (< 400 ($\mu\text{m}/\text{m}$) et de la fissuration des surfaces.

I.5.EFFETS DE LAITIER GRANULE COMME SABLE :

L'incorporation du laitier granulé brut dans un béton classique de granulats naturels, en remplacement de tout ou partie du sable, se traduit par une augmentation des résistances mécaniques (à dosage en ciment constant). Le malaxage et la mise en œuvre provoquent l'attrition des fines hydrauliques dont l'action vient se cumuler avec celle de la liaison pâte de ciment – sable de laitier granulé (les deux produits sont hydrauliques et présentent une affinité réciproque). Par contre, la rhéologie des mélanges peut se trouver affectée, le béton devenant rêche et perdant sa maniabilité, à dosage en eau constant.

Pour améliorer la rhéologie des mélanges, on introduit des ajouts, telles les cendres volantes qui non seulement améliorent la rhéologie de ces bétons mais ont de surcroît des propriétés pouzzolaniques. Elles lubrifient les mélanges et augmentent leur compacité par remplissage des vides. L'amélioration de la maniabilité peut aussi être assurée par une charge inerte telle qu'un filler naturel, le plus souvent du calcaire. Indépendamment de son action sur l'ouvrabilité (onctuosité du produit, plastifiant rétenteur d'eau), la chaux grasse jouera un rôle d'activation du laitier. L'emploi des adjuvants améliore la rhéologie des bétons de laitier granulé, mais peut répondre à d'autres critères (réduction du dosage en eau à maniabilité constante, soit une augmentation de la résistance mécanique à dosage en ciment constant). [18]

I.6 CARACTERISATION D'UN BETON AUTOPLACANT :

I.6.1.Caractéristiques à l'état frais :

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Il n'existe pas d'essai standard, ni de critère bien défini pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. En effet, le comportement spécifique des BAP à l'état frais rend quasi inadaptés la plupart des essais classiques sur les bétons traditionnels : les essais au maniabilimètre ne sont pas possibles en l'absence de vibration et l'essai classique d'affaissement au cône d'Abrams est inopérant, l'affaissement étant ici « total ». C'est pourquoi les chercheurs et les industriels ont développé toute une série d'essais plus ou moins complémentaires, mais dont l'interprétation reste bien souvent subjective et dépendante de l'opérateur. **La figure 1.6** illustre la diversité des dispositifs expérimentaux proposés [19]. Dans la suite du document seront présentés les essais proposés par l'AFGC qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisés. Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP.

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

- Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams)
- Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L)
- Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis)

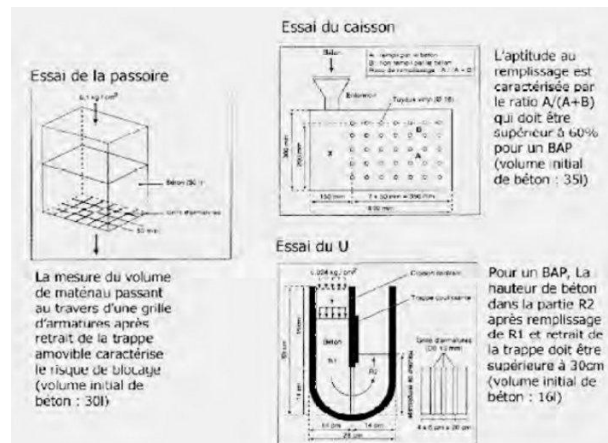


Figure 1.6 : Dispositifs expérimentaux [19]

➤ Capacité au remplissage :

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects [20].

➤ **Capacité de passage :**

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures.

En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement [20].

➤ **Résistance à la ségrégation :**

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [21]-La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes comme :

- La séparation entre la pâte et les granulats.
- La séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées.
- Une répartition non homogène de l'air occlus.

Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en levant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité.

➤ **Rhéologie des BAP :**

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

Comme certains matériaux ne répondent pas exactement à la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides, le vocable « rhéologie » a été inventée par des physiciens spécialistes de l'étude des matériaux dirigés par E.C. Bingham. Entre le solide parfait et le liquide parfait newtonien, il est apparu nécessaire d'élaborer cette discipline nouvelle. L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis son apparition en 1928 avec l'apparition des nouvelles substances au comportement complexe tel que : pâtes, boues, suspensions, émulsions, polymères, etc. Pour le cas du béton, on s'intéressera à l'étude de l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable.[22]

I.6.1.1 Essais sur béton frais :

Avant d'accepter une composition comme celle d'un BAP , il faut s'assurer que le béton résultant possède effectivement les qualités qu'on espère . Pour cela , il existe de nombreux essais permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton à l'état frais .

➤ Essai d'étalement au cône d'Abrams :

Utilisé pour estimer la fluidité des BAP sans confinement il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier , l'essai est caractérisé par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou 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 , à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante , puis il est rempli de BAP . Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie , la valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue qui devrait être comprise entre 550 et 850 mm [23]

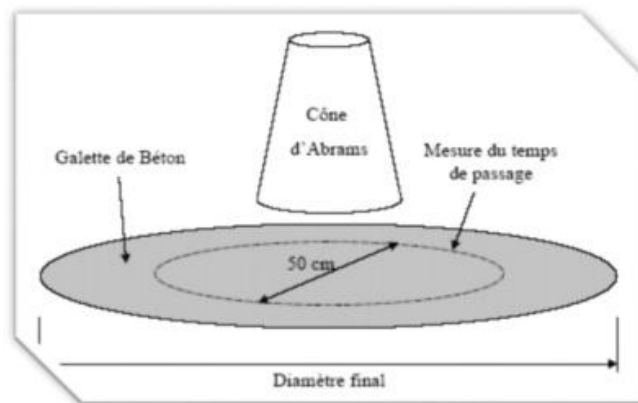


Figure I.7 :Essai d'étalement au cône d'Abrams.

➤ Essai d'entonnoir (V-Funnel) :

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant : il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en forme de V " V-Funnel " montré dans la (**Figure I.8**), ou parfois un entonnoir à section circulaire " O-Funnel " montré dans la (**Figure I.9**).Le V-Funnel est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe.

L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice. Le béton autoplaçant doit s'écouler avec une vitesse constante ; un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le béton.

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Cet essai permet aussi d'évaluer la viscosité du béton lors de l'écoulement : pour des bétons de même étalement au cône d'Abrams par exemple, la viscosité est d'autant plus élevée que la durée de l'écoulement à l'entonnoir est longue.

Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante. [22]

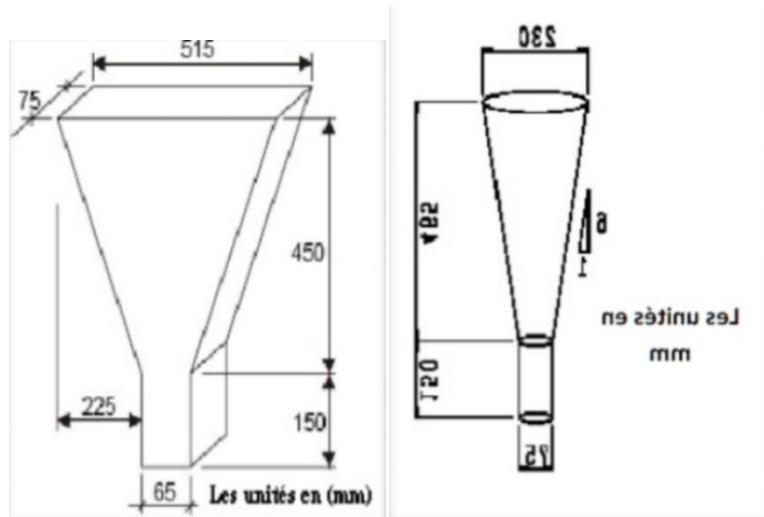


Figure I.8 : Entonnoir (V-Funnel)

Figure I.9 :Entonnoir (O-Funnel).

➤ Essai de la boîte en L (L-Box) :

Pour caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique, aucun essai de référence n'a encore fait l'unanimité, mais tous ont pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de détecter des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement. L'essai de la boîte en L (**figure 1.10**) fait partie de ces essais. La partie verticale du L est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres $\phi 14$) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre 2 barres) [AFGC 00].

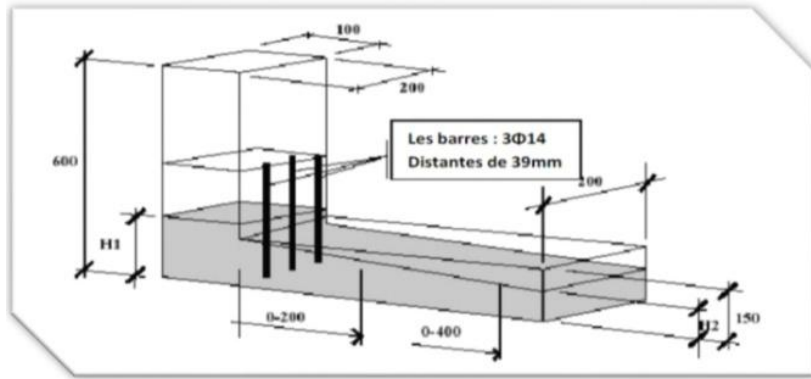


Figure. I.10 :La boîte en L.

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H_2/H_1 , voir **figure 1.10**) doit être supérieur à 0,8 [AFGC 00]. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton. Les essais du tube en U, du caisson et de la passoire permettent aussi de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des BAP [24].

➤ **Essai de stabilité au tamis :**

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (**Figure I.11**). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (**P Laitance**) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm

P Laitance = masse de laitance / masse de l'échantillon



Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.11 : Essai de stabilité au tamis.

La mesure de pourcentage de laitance conduit à classer les formulations de béton autoplaçant de la façon suivante (**Tableau I.1**). [22]

Conditions	Critère de stabilité	Remarques
$0\% \leq \text{Plaitance} \leq 15\%$	Stabilité satisfaisante	Béton homogène et stable
$15\% \leq \text{Plaitance} \leq 30\%$	Stabilité critique	Vérifier les autres critères d'ouvrabilité
$\text{Plaitance} > 30\%$	Stabilité très mauvaise	Béton inutilisable

Tableau .I.1 Critère de stabilité

I.6.2 Caractéristiques à l'état durci :

Diverses études [25, 26, 27, 28] comparent l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires à celle des bétons vibrés. Ces auteurs observent une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours. Ceci est expliqué par une hydratation favorisée par une multiplication des sites de nucléation des fines du filler.

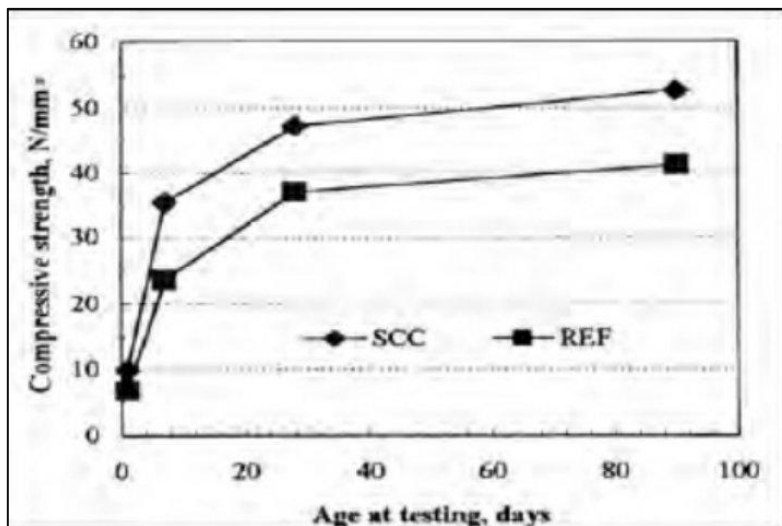


Figure 1.12 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [25]

Pour Petersson [29], cette résistance augmente d'autant plus que la finesse du filler est importante.

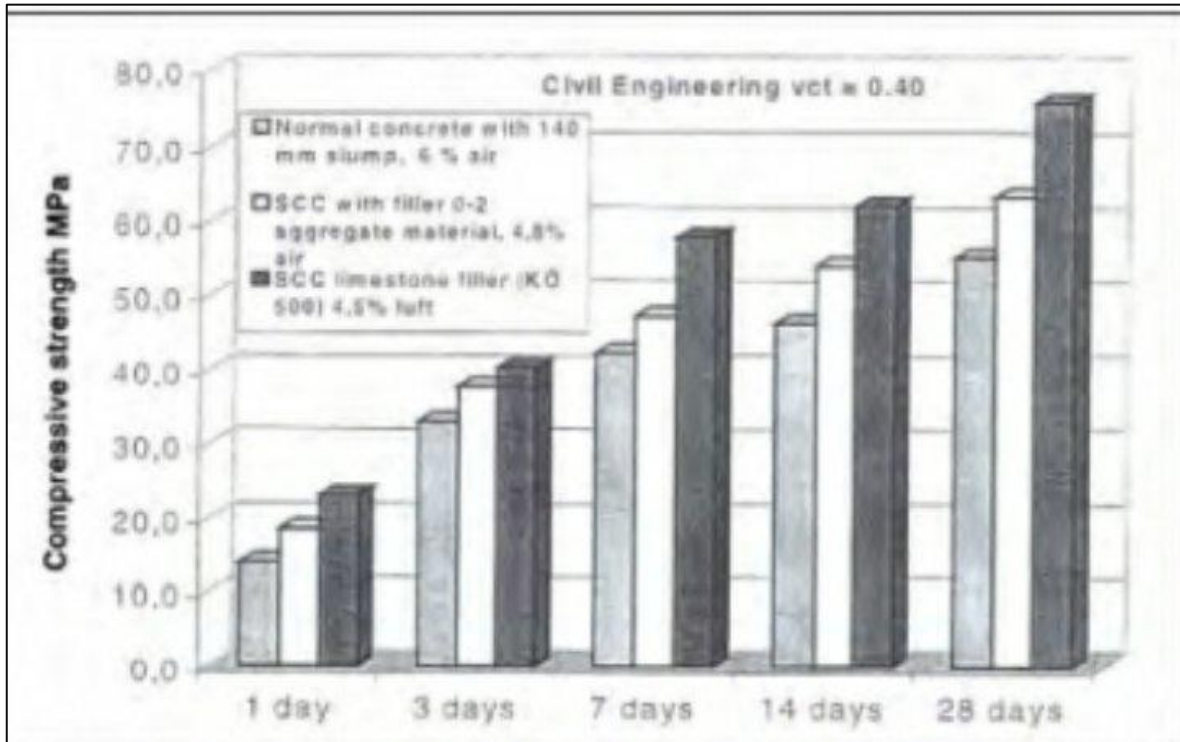


Figure 1.13 – Résistance mécanique d'un béton vibré et de 2 BAP [29]

De plus, les superplastifiants et les agents de viscosité ont des répercussions sur la résistance mécanique des bétons autoplaçants. Selon Felekoglu et al. [30], l'agent de viscosité diminue la résistance aux jeunes âges. Par contre, certains superplastifiants entraînent des effets secondaires comme le retard de la prise qui aboutit à l'augmentation du développement de la résistance mécanique au jeune âge [31]. Mais, à long terme, la résistance en compression des BAP est, soit inférieure à celle des BV [32, 33, 34] ce qui est attribué aux quantités importantes de fluidifiant et à la présence du filler calcaire, soit égale à celle des BV [35, 36, 37]. Un autre élément influençant la résistance à la compression est le volume de la pâte. Turcry et al. [38] montre que le volume de pâte a un effet réel mais limité sur la résistance en compression. Il est observé une diminution de 12% de la résistance pour une augmentation de 57% du volume de pâte. De même, Pineaud [39] constate que le volume de pâte a une faible influence sur la résistance en compression. Parallèlement au volume de pâte, le rapport E/L est un des facteurs les plus influents sur la résistance en compression. Pineaud [39] montre que l'influence du rapport E/L est comparable à celle obtenue par d'autres auteurs sur des BV [40, 41].

➤ **Le module élastique :**

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant un béton. Or, un BAP est composé d'un volume de pâte important et de rapport G/S plus faible qu'un BV. D'après différents codes (Eurocode ou DTU), le module d'élasticité est fonction de la résistance en compression des bétons. Donc, à résistance égale, un BAP devrait avoir le même module qu'un béton vibré. Or, Persson [35] et Pons et al. [42] ont montré que le module est similaire pour les BAP et les BV. De même, König et al. [42]

constatent que les modules des BAP sont très proches de ceux des BV. D'autres auteurs indiquent un module plus faible que ceux des bétons vibrés [1, 32, 39].

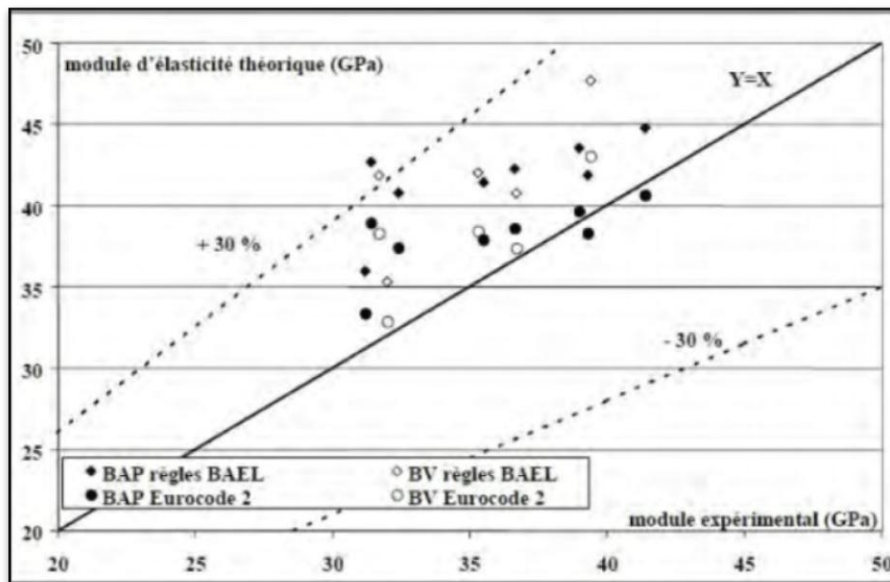


Figure 1.14 : Comparaison des modules d'élasticité d'après les codes de construction de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [42]

Comme pour la résistance à la compression, d'autres paramètres influencent le module d'élasticité. Turcry et al. [38] montrent une diminution du module des BAP avec l'augmentation du volume de pâte. Mais, selon ces mêmes auteurs, l'influence du volume sur le module est négligeable. En effet, Pineaud [39] observe des valeurs de déformations à la rupture très proches pour les BAP et les BV. Parallèlement au volume de pâte, il est observé une diminution du module avec l'augmentation du rapport E/L (Résultat en accord avec la diminution de la résistance en compression et la diminution de la compacité de la matrice) [39].

➤ Résistance à la traction

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance en traction [43]. Ils montrent que l'augmentation de la quantité de sable ou/et du volume de fines entraîne une élévation de la résistance en traction. En effet, la résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus. Pour certains auteurs [32, 43], la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des BV. Donc, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%). Ces résultats sont repris par Pineaud [39]. Il suggère que la qualité de l'interface pâte-granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures.

I.7 DIFFERENTES TYPES DE FORMULATION (MTHODES) :

Pour formuler les bétons auto-plaçant l'AFGC recommande les paramètres ci-dessous [44] :

- une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total) ;
- une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/ m³) ;
- utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation) ;
- éventuellement utilisation d'un agent viscosant.
- un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1) ;
- un diamètre maximal réduit ; Les auteurs [45, 46] s'accordent sur le fait qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays

Plusieurs méthodes de formulations des bétons autoplaçants existent aujourd'hui dont un grand nombre a été publié dans les différents congrès dédiés aux BAP [47].

➤ Méthode japonaise :

La méthode Japonaise développée par Okamura et Ozawa est l'une des premières méthodes mises au point pour la formulation des bétons autoplaçants à étalement d'au moins 65cm [48]. 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 90µm 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 [49].

➤ Méthode Française :

Le principe de formulation proposé par de Larrard [5] se base sur le fait que la rhéologie du béton dépend de l'arrangement de son squelette granulaire. L'optimisation de la compacité du béton permet de réduire la teneur en eau à ouvrabilité constante. Les modèles développés permettent d'étudier des mélanges de grande étendue granulaire et ainsi de prendre en compte la contribution des différents constituants des bétons. Dans un empilement, si tous les grains sont arrangés de manière optimale, la compacité maximale (γ_i) est atteinte (paramètre également appelé compacité virtuelle dont nous ne donnerons pas l'équation ici). Or dans la pratique, un empilement ne peut pas atteindre cette compacité virtuelle. Un paramètre a été calculé afin de rendre compte de la compactibilité des mélanges, c'est à dire la capacité des bétons à se mettre en place dans un moule donné, selon un procédé donné. Il est exprimé selon la forme :

$$K' = \sum_i K'_i = \sum_i \frac{y_i / \beta_i}{\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{\gamma_i}}$$

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Avec K_i' indice de serrage de chacune des classes granulaires, y_i est la proportion volumique des grains de diamètre d_i , β_i est la compacité virtuelle des grains de classe i , γ_i est la compacité réelle du mélange, γ_i est la compacité virtuelle lorsque la classe i est dominante.

En se basant sur ce concept et après validation expérimentale, de Larrard et Ferraris [50], proposent également des modèles pour décrire le seuil d'écoulement et la viscosité des bétons. Dans le cas d'un dosage en superplastifiant au dosage à saturation, les expressions obtenues sont les suivantes :

$$\tau_0 = \exp(2.537 + 0.540K'_g + 0.854K'_s + 0.224K'_c)$$
$$\mu = \exp\left(26.75\left(\frac{\varphi}{\varphi^*} - 0.7448\right)\right)$$

Où est la compacité maximale du mélange et les indices g , s et c correspondent respectivement au granulat, au sable, et au ciment.

Sedran [51] obtient des constantes légèrement différentes donnant une meilleure description des faibles viscosités :

$$\mu = \exp\left(45.88\left(\frac{\varphi}{\varphi^*} - 0.8512\right)\right)$$

Les différentes données sont ensuite insérées dans un logiciel calculant les différentes propriétés du béton. Ce logiciel permet également d'optimiser la formule de béton à partir d'un cahier des charges précis.

➤ Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons [52]. Il est connu par exemple, que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi, tributaire de l'arrangement du squelette granulaire ; Dans ce cas le béton est considéré ici comme un mélange bi-phasique, avec une phase solide, les granulats et une phase liquide, la pâte. Dans le cas des BAP, la pâte joue un rôle prédominant. C'est alors que la notion d'excès de pâte est introduite, la formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

I.8 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS D'UN BETON AUTOPLACANT

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.8.1 Avantages d'un BAP :

Les BAP présentent [53] une avancée importante en matière de technologie de construction. Leurs propriétés spécifiques permettent d'optimiser l'organisation des chantiers et des usines, conduisant à une amélioration de la productivité et une réduction des coûts de constructions.

Les BAP sont particulièrement adaptés pour la réalisation d'ouvrages en zones sensible soumises à des exigences acoustiques (notamment en site urbain). leurs atouts sont multiples :

- Réduction des temps de bétonnages (augmentation des cadences de coulages, en particulier, grâce à la mise en œuvre possible du béton à la pompe) ;
- Facilité de mise en œuvre et gain sur les postes de travail, obtenu par le pompage du béton et la suppression de la vibration ;
- Amélioration de la sécurité des ouvriers, en supprimant des postes de travail à risque (en partie haute des coffrages au moment du bétonnage en particulier) ;
- Réduction des délais de réalisation du chantier et des éléments préfabriqués en usines ;
- Economie sur les coûts de la main d'œuvre nécessaire à la vibration ;
- Réduction des besoins en matériel ;
- Amélioration de productivité et des cadences ;
- Optimisation de la charge d'utilisation de la grue de chantier ;
- Réduction des coûts d'entretien des coffrages et des moules ; ces derniers ne sont pas sollicités par les effets de la vibration ;
- Réduction de l'encombrement sur chantier ;
- Réduction des nuisances sonore pour l'environnement du chantier et sur le chantier ;
- Meilleure qualité des parements ;
- La possibilité de résoudre des contraintes techniques, générées par la complexité des formes des structures, la densité du ferrailage, la réalisation des réservations complexes.
- Réduction des délais (rapidité de mise en place du béton), gain de productivité, économie de main d'œuvre.
- Augmentation de la durée de vie des coffrages.
- Qualité des parements accrue et amélioration des aspects de surface.
- Sans opération habituelle de vibration, parfait enrobage des armatures et parement très lisse, homogénéité et esthétique.

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- Caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages tout en résistant parfaitement à la ségrégation.
- Réalisation de formes plus sophistiquées ou complexes.
- Performance sur chantier : coulage en un seul point, rapidité de mise en place, arase automatique de la surface, bon enrobage des aciers et bon aspect de surface au décoffrage, suppression du surfaçage mécanique lors de la confection de dalles, dallages ou chapes

I.8.2 Les inconvénients :

La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et l'entrepreneur du chantier. En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent. De plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours disponibles de stock chez les fabricants [54].

I.9 MISE EN ŒUVRE :

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

En terme de mise en oeuvre, les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Un des avantages majeurs des BAP, que nous aborderons également dans la partie traitant de leur impact économique, est la réduction de la durée de la phase de coulage : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement du matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure est plus facile à réaliser.

La méthode traditionnelle de remplissage par le haut du coffrage peut être utilisée avec une hauteur de chute plus importante. Il convient cependant de la limiter à 5m, pour éviter des problèmes de ségrégation dus à la chute du béton dans le coffrage [55]. L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau. La fluidité des BAP permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux.

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

D'après les recommandations de l'Association française de Génie Civil [55], quel que soit le mode de remplissage retenu, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages. Une perte d'homogénéité peut en effet se manifester lorsque ce cheminement est trop important. Ainsi, La longueur de cheminement maximale préconisée est de 10 m. (Dans certains cas, elle peut être limitée à 5 m. Concernant la préparation des coffrages, notamment vis à vis de l'étanchéité et de l'absence de débris, les précautions à prendre sont similaires à celles pratiquées pour les bétons traditionnels [55]. Les recommandations de la Fédération française du béton [4] précisent cependant que l'étanchéité en pied de coffrage est essentielle et que la propreté des coffrages est à vérifier tout particulièrement. En effet, l'aspect de surface des BAP étant un de leurs principaux atouts, il convient d'apporter un soin particulier à la préparation des coffrages. Ce temps de préparation supplémentaire n'est cependant pas pénalisant pour l'avancement du chantier et reste négligeable face au gain de temps apporté par la suppression de la phase de vibration.

L'absence de vibration simplifie par ailleurs le calage des armatures et des réservations. Comme pour les bétons traditionnels, il convient de vérifier les conditions atmosphériques avant coulage. En dehors de l'intervalle 5 - 25°C, des dispositions particulières sont à prendre [56,57]. Une attention particulière doit être apportée à la cure des BAP, et pour éviter l'évaporation, et particulièrement lorsque le rapport surface/volume est important.

Le faible ressuage des BAP les rend en effet plus sensibles au retrait hydrique [55,58] d'une manière générale, il est recommandé d'éviter une évaporation trop importante dans les premières heures après mise en œuvre [55].

I.10 LES DOMAINES D'UTILISATION DE BETON AUTOPLACANT :

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 aux ouvriers,
- obtention de très bonnes qualités de parement.

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

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

L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

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 [59] précise cependant que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis.

Leur utilisation est plus délicate sur site car Les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes.

En effet, la formulation des BAP est particulière : utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite donc la mise en place d'un suivi plus important. Nous verrons que les différentes précautions à prendre sur chantier et que la composition même du matériau peuvent entraîner un surcoût.

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 oeuvre, la réduction des délais et la qualité des parements [60].

A titre d'exemple nous citerons quelques réalisations japonaises :

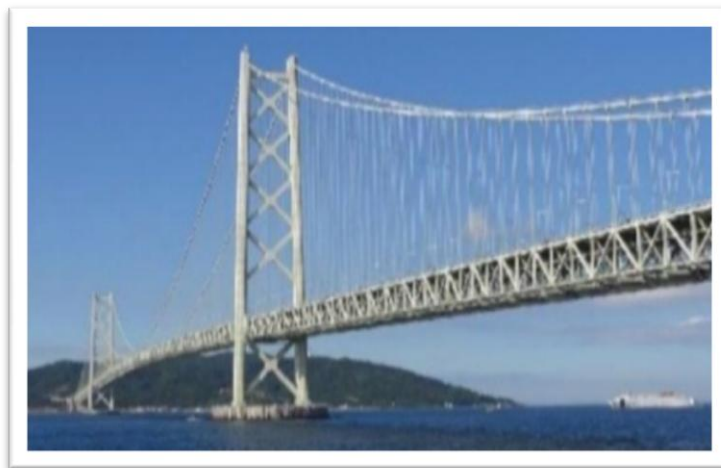


Figure1.15 : Le pont Akashi Khaikyo . [61]



Figure1.16 : La tour Landmark Tower . [62]

Quelques photos présentes des différentes réalisations avec le BAP :



Figure1.17 : Béton autoplaçant pour la réalisation d'ouvrages techniquement complexes [63]



Figure1.18 : Béton autoplaçant renforcé de fibres haute performances pour la réalisation de planchers en dalles de compression sur poutrelles-hourdis [63]



Figure 1.19 : Béton autoplaçant pour la réalisation des dallages sur terre-plein [63]



Figure 1.20 : Béton autoplaçant pour la réalisation de voiles , de poteaux et de poutres apparents [63]



Figure 1.21 : Béton autoplaçant pour la réalisation de voiles , de poteaux et de poutres courants [63]



Figure1.22 : Béton autoplaçant pour la réalisation de plancher en dalles pleines ou dalles de compression sur poutrelles-hourdis[63]



Figure1.23 : Béton autoplaçant pour ouvrages en milieux agressifs [63]

I.11 CONCLUSION :

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons autoplaçants,


L'objectif étant de les définir, ainsi que leurs multiples propriétés, les caractériser, et résumer les principales méthodes de leur formulation.

Les propriétés caractéristiques de ce béton à l'état frais sont :

- ❖ Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation
- ❖ Capacité de passage dans les milieux confinés
- ❖ Excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de ferrailage dense. Le fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé.

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser le béton vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité.



Chapitre II :
CARACTERISTIQUES DES
MATERIAUX ET METHODES
DE FORMULATION

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

II.1 INTRODUCTION :

Nous présenterons dans ce chapitre, les différents qualités et caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection des bétons. Les essais ont été effectués au Laboratoire de génie civil de l'Université Badji-Mokhtar Annaba.

II.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISE

Les propriétés et les caractéristiques des matériaux de construction déterminent le domaine de leur application.

Ce n'est qu'en évaluant ou déterminant exactement les qualités et les caractéristiques les plus importantes des matériaux utilisés, que nous pourrons confectionner des bétons qui nous permettent de construire des ouvrages solides, durables et de haute efficacité économique et technique.

Toutes les caractéristiques des matériaux de construction, d'après l'ensemble de leurs indices, sont divisées en caractéristiques physiques, chimiques ou mécaniques, ces derniers dépendent de leur tour, de la nature et de l'origine des matériaux.

Les caractéristiques sont déterminées expérimentalement selon les normes françaises AFNOR

II.2.1 Le ciment :

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment de type CPJ-CEM II/B de classe 42.5, c'est un ciment portland composé, résultant d'un broyage simultané de clinker (70 à 80 %), de laitier granulé (15 à 25 %) et de gypse (5 %), provenant de la cimenterie HDJAR SOUDE SKIKDA

La composition chimique et minéralogique du ciment et ses caractéristiques physiques sont données dans les tableaux 1, 2 et 3.

Tableau II. 1 : Compositions chimiques du ciment

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	CaO, libre
en %	61.53	4.69	17.38	2.72	1.55	0.20	0.95	2.44	8.20	0.00

Tableau II. 2 : Compositions minéralogiques du clinker.

Minéraux	C3S	C2S	C3A	C4AF	Gypse	Ajouts
% massique	59	16	9	10	5	15% calcaire

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

Tableau II. 3 : Caractéristiques physiques du ciment

Caractéristiques	Unités	Valeurs
Consistance normale	%	27
Début de prise	min	150
Fin de prise	min	250
Masse volumique absolue	Kg/m ³	3100
Masse volumique apparente	Kg/m ³	1020
Surface spécifique Blaine	Cm ² /g	3420
Refus au tamis 80µm	%	1.36
Résistance moyenne en compression à 28 jours	MPa	46

II.2.2 L'eau :

L'eau potable sert de référence pour la formulation du béton à cause de sa disponibilité (distribuée par les services publics).

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques).

Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton.

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton.

L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent.

Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais.

II.2.3 Squelette granulaire :

C'est-à-dire le mélange de sable et de graviers, intervient dans la résistance finale du béton, occupent près de la 3/4 du volume du béton et influent donc sur ses propriétés.

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

II.2.3.1 Le sable :

On a utilisé deux types de sables :

- ✓ sable roulé siliceux de dune Est un sable (de module de finesse de 2,51 utilisé dans la composition 100% sable et de module de finesse de 2.1 pour les autres compositions)
- ✓ laitier granulé du complexe sidérurgique d'El-HadjarII se présente sous forme de grains sphériques, de couleur jaune clair (de module de finesse 2.5 pour la composition 100% laitier et de module de finesse de 2.9 pour les autres compositions)

La répartition en oxydes de la masse du sable et du laitier sont données par **les tableaux 4 et 5**

Tableau II. 4 : Les pourcentages des éléments majeurs et mineurs du sable siliceux.

Elements	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
%	90.46	1.38	1.92	1.63	0.39	0.2	0.00	0.22	2.56

Tableau II .5 : composition chimique de laitier granulé.

Elements	SiO ₂	Fe	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Soufre	MnO
%	39.82	1.54	8.76	37.2	5.62	0.70	2.05

• Masse volumique apparente du sable siliceux et du laitier granulé :

La procédure utilisée pour la détermination de cette grandeur est présentée à travers la figure suivante :



Figure II. 1 : Mesure de la masse volumique apparente du laitier granulé.

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

Tableau II. 6 : Masse volumique apparente du laitier granulé.

Volume d'un récipient connu (ml)	Volume	1000
Masse de sable contenu dans le récipient (gr)	Masse	936.1
Masse volumique apparente MV (gr/ml)	ρ_{app}	0.9361
$\rho_{app}=936.1\text{kg/m}^3$		

La masse volumique absolue (ρ)

Est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

➤ Principe de mesure (Méthode de l'éprouvette graduée) :

Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau. Peser un échantillon sec M de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air. Le liquide monte dans l'éprouvette, lire le nouveau volume V_2 .

La masse volumique absolue est alors : $\rho = M / (V_2 - V_1)$

❖ Masse volumique absolue du sable et laitier granulé :

C'est la masse de l'unité de volume de la substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.



Figure II. 2 : Mesure de la masse volumique absolue du laitier granulé et sable siliceux.

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

Tableau II. 7: Masse volumique absolue du sable (laitier granulé).

Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	400
Masse de l'échantillon (gr)	M	300
Lire le nouveau volume (ml)	V2	560
Masse volumique absolue $M/(V2-V1)$	ρ_{Abs}	1.87
$\rho_{Abs}=1870 \text{ kg/m}^3$		

Tableau II. 8: Masse volumique absolue du sable siliceux

Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	400
Masse de l'échantillon (gr)	M	300
Lire le nouveau volume (ml)	V2	520
Masse volumique absolue $M/(V2-V1)$	ρ_{Abs}	2.5
$\rho_{Abs} = 2500 \text{ kg/m}^3$		

➤ **Equivalent de sable : Norme [NF18-598]**

Selon la norme NF18-598 qui décrit de manière détaillé le mode opératoire concernant cet essai .

Cet essai a pour but de mesurer la propreté d'un sable. L'essai est effectué sur la fraction 0/5mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé. Pour cela on utilise une solution lavante, elle permet de séparer les éléments fins argileux et provoque la floculation. Après décantation, on mesure la hauteur des fines floculées, (sable propre + éléments fins = h_i) et la hauteur de sable propre (h_2 si c'est au piston ou h'_2 si c'est au réglet).

Cet essai nous permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuse contenues dans le sable et la poussière nuisibles et des éléments argileux qui diminuent la qualité des bétons et provoque des gonflements de retraits.

Mode opératoire :

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500 g).
- Prendre une pesée de 120 g.
- Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au premier repère (10cm).
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans L'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de La main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

- Laisser reposer pendant 10 minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20cm de cours horizontale en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette, Rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution lavante atteigne le 2ème repère. Laisser ensuite reposer pendant 20 minutes.
- Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h1 du niveau supérieur du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$ESV = h2/h1 \times 100[\%]$$



Figure II .3 : Mesure de la propreté du sable.

Tableau II. 9 : Résultat de l'équivalent de sable siliceux.

h1	8.5
h2	10
Sur l'échantillon : E.S.V	85

L'ESV de notre sable est de 85%, ce qui montre qu'il est très propre.

L'ensemble des résultats, à l'exception de l'étendue granululaire, montre que le sable utilisé répond aux différentes normes utilisées.

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

➤ Analyse granulométrique : Norme [NFP18-304]

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon, la distribution en poids des particules d'un granulat suivant leur dimension permet de déterminer sa continuité.

➤ Sable siliceux 1 : masse totale= 995.8g

Tableau II. 10: Résultats sable siliceux 1

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %
5	0	0	0
4	4.9	0.49	0.49
3.15	9.3	0.93	1.42
2.5	62.5	6.25	7.67
1.6	41.9	4.2	11.87
1.25	73.8	7.38	19.25
1	45.5	4.56	23.81
0.63	150.4	15.04	38.85
0.5	399.5	39.95	78.8
0.315	85.4	8.54	87.34
0.16	98.04	9.80	97.14
Fond	28.01	2.8	99.94

➤ Module de finesse :

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis [5-2.5-1.25-0.63-0.315 et 0.16 mm] sur 100 et calculé par la relation suivante :

$MF = \sum RC/100$ ou : RC : refus cumulé

Mf=2.5 (le sable utilisé est un sable moyen)

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

➤ **Sable siliceux 2** : masse totale = 996.7g

Tableau II. 11: Sable siliceux 2

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %
5	0	0	0
4	0	0	0
3.15	0	0	0
2.5	0.3	0.3	0.03
1.6	121.3	12.17	12.2
1.25	236.6	0.23	12.43
1	142.9	14.33	26.76
0.63	292.9	29.38	56.14
0.5	84	8.42	64.56
0.315	36.8	3.69	68.25
0.16	49.1	4.92	73.17
Fond	32.8	3.29	76.56

Module de finesse: $M_f = 2.1$

- **Laitier granulé (0/ 2):** masse totale = 996.7g

Tableau II.12: Résultats Laitier granulé (0/2)

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %
5	0	0	0
4	0	0	0
3.15	0	0	0
2.5	3	0.3	0.3
1.6	121.7	12.17	12.47
1.25	5.3	0.53	13
1	143.3	14.33	27.33
0.63	273.8	27.38	54.71
0.5	84.2	8.42	63.13
0.315	266.9	26.69	89.82
0.16	49.1	4.91	94.73
Fond	52.5	5.25	99.98

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

Module de finesse :MF = 2.5

- **Laitier granulé (0/ 3.15) : masse totale =996.5g**

Tableau II. 13:résultats Laitier granulé (0/3.15)

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %
5	0	0	0
4	0	0	0
3.15	0.6	0.06	0.06
2.5	22	0.22	0.28
1.6	142.8	14.33	14.61
1.25	234.3	23.51	38.12
1	140.2	14.06	52.18
0.63	259.8	26.07	78.25
0.5	88.2	8.85	87.1
0.315	17.3	173	88.83
0.16	49.8	4.99	93.82
Fond	61.3	6.15	99.97

Module de finesse :MF = 2.9

- **Sable mélangé (25%Laitier granulé 0/3.15 ,75%Sable siliceux) :**

Tableau II. 14: Résultats Laitier granulé (0/2)

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %
5	0	0	0
4	0	0	0
3.15	0	0	0
2.5	20	2	2
1.6	170	17	19
1.25	100	10	29
1	45	4.5	33.5
0.63	140	14	47.5
0.5	70	7	54.5
0.315	360	36	90.5
0.16	67	6.7	97.2
Fond	20.45	2.04	99.6

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

Module de finesse :MF = 2.6

- **Sable mélangé (50%Laitier granulé 0/3.15 ,50%Sable siliceux) :**

Tableau II. 15:résultats (50%Laitier granulé 0/3.15 ,50%Sable siliceux)

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %
5	0	0	0
4	0	0	0
3.15	0	0	0
2.5	20	2	2
1.6	158.8	15.88	17.88
1.25	164	16.4	34.28
1	39.7	3.97	38.25
0.63	160.3	16.03	54.28
0.5	83.4	8.34	62.62
0.315	206.5	20.65	83.27
0.16	138.9	13.89	97.16
Fond	27.7	2.77	99.93

- **Module de finesse :MF = 2.7**
- **Sable mélangé (75%Laitier granulé 0/3.15 ,25%Sable siliceux) :**

Tableau II. 16:résultats (75%Laitier granulé 0/3.15 ,25%Sable siliceux)

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %
5	0	0	0
4	0	0	0
3.15	0	0	0
2.5	30	3	3
1.6	173.4	17.34	20.34
1.25	159.8	15.98	36.32
1	52.5	5.25	41.57
0.63	148.6	14.86	56.43
0.5	72.9	7.29	63.72
0.315	281.1	28.11	91.83
0.16	42.3	4.23	96.06
Fond	21.9	2.19	99.25

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

- **Module de finesse :MF = 2.8**

II.2.3.2 Les scories (laitier cristallisé) :

Les scories d'aciérie sont aujourd'hui reconnues comme de véritables matériaux valorisés.

Ils constituent une ressource industrielle pérenne et régulière, soumise à une assurance qualité qui permet de générer des produits de haute gamme, conformes aux normes techniques en vigueur.

Tableau II.17 : Composition chimique élémentaire de la scorie

Elément	Masse (%)	Atomique (%)
OK	23.96	45.79
MgK	1.00	1.26
ALK	0.56	0.63
Si K	6.77	7.37
Ca K	36.26	27.66
Mn K	8.27	4.60
Fe K	23.17	12.68

- **Masse volumique apparente du scories(3/8 et 5/16) :**



Figure II.4: Procédé utilisé pour déterminer de la masse apparente du laitier cristallisé (3/8 et 5/16)

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

Tableau II. 18 : Masse volumique apparente du laitier cristallisé 3/8.

Volume d'un récipient connu (ml)	Volume	1000
Masse de laitier contenu dans le récipient (gr)	Masse	1217
Masse volumique apparente M/V (gr/ml)	$M\rho_{app}$	1.217
$\rho_{app}=1217 \text{ kg/m}^3$		

Tableau II. 19 : Masse volumique apparente du laitier cristallisé 5/16.

Volume d'un récipient connu (ml)	Volume	1000
Masse de laitier contenu dans le récipient (gr)	Masse	1339.1
Masse volumique apparente M/V (gr/ml)	$M\rho_{app}$	1.339
$\rho_{app}=1339 \text{ g/m}^3$		

- **Masse volumique absolue de laitier cristallisé 3 8 et laitier cristallisé 5/16 :**
Les résultats des mesures, sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau II. 20:Masse volumique absolue Laitier cristallisé 3/8

Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	400
Masse de l'échantillon (gr)	M	300
Lire le nouveau volume (ml)	V2	510
Masse volumique absolue $M/(V2-V1)$	ρ_{Abs}	2.72
$\rho_{Abs} = 2720 \text{ kg/m}^3$		

Tableau II. 21 :Masse volumique absolue Laitier cristallisé 5/16

Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	400
Masse de l'échantillon (gr)	M	300
Lire le nouveau volume (ml)	V2	520
Masse volumique absolue $M/(V2-V1)$	ρ	2.5
$\rho_{Abs} = 2500 \text{ kg/m}^3$		

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

- **Absorption d'eau :**

Tableau II. 22 : Absorption d'eau des graviers laitier cristallisé 3/8

Masse de l'échantillon (gr)	Mh	314
Masse de l'échantillon après séchage (gr)	Ms	278.7
Absorption d'eau (%) $(Mh - Ms) / Ms$	Abs	0.13
CAE=13%		

Tableau II. 23: Absorption d'eau des graviers de laitier cristallisé 5/16

Masse de l'échantillon (gr)	Mh	732.5
Masse de l'échantillon après séchage (gr)	Ms	703.2
Absorption d'eau (%) $(Mh - Ms) / Ms$	Abs	0.14
CAP=14%		

- **Analyse granulométrique de laitier cristallisé 3/8 :**

Les résultats de l'analyse granulométriques de la fraction 3/8 sont représentés sur le tableau II-24

Tableau II. 24: Résultat de l'analyse granulométrique de laitier cristallisé 3/8

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât
8	7.2	0.45	0.45	99.55
6.3	201.4	12.6	13.05	86.95
5	165.7	10.36	23.41	76.59
4	515.8	32.27	55.68	44.32
3.15	559.8	35.02	90.7	9.3
Fond	148.2	9.27	99.97	0.03

Laitier cristallisé 3/8 : masse totale = 1598.1g

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

- Analyse granulométrique de laitier cristallisé 5/16 :

Tableau II. 25: resultat de l'analyse granulométrique de laitier cristallisé 5/16

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât
16	0	0	0	100
12.5	848.3	26.52	26.52	73.48
10	996.7	31.16	57.68	42.32
8	726.5	22.71	80.39	19.61
6.3	423.8	13.25	93.64	6.36
5	152.9	4.78	98.42	1.58
Fond	49.7	1.55	99.97	0.03

Laitier cristallisé 5/16 : masse totale = 3197.9g

II.2.4 Additions minérales :

II.2.4.1 les fillers calcaire :

Ce sont des déchets de concassage des roches calcaires composées essentiellement de calcite CaCO_3 avec une teneur supérieure à 80 %. Il se présente sous forme d'une poudre de couleur blanche (Figure1) et d'une finesse supérieure à celle du ciment. Le filler calcaire utilisé provient de la carrière d'El-khroub de constantine . La composition chimique et les propriétés physiques du filler calcaire sont présentées dans **le tableau 28**.

Tableau II. 27:Composition chimique et Caractéristique chimique des fillers calcaires

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxyde	%massique	Désignation	Unité	Valeurs
CaO	55.91	Masse volumique absolue	g/cm ³	2.69
Al ₂ O ₃	0.11			
Fe ₂ O ₃	0.06	Masse volumique apparente	g/cm ³	0.96
SiO ₂	0.40			
MgO	0.18	S.S.B	Cm ² /g	6285
Na ₂ O	0.05			
K ₂ O	0			
Cl-	0.009	Refus au tamis 5µm	%	19
SO ₃	0.04			
P.A.F	42.68	Refus au tamis 40µm	%	24

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

II.2.4.2 Super plastifiant :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant à base de poly-carboxylates modifiés, sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique selon un taux de 0.6 à 3% du poids de ciment. Ces caractéristiques sont les suivantes :

Forme	visceux;
Couleur.....	miel foncé;
Masse volumique... ..	1110 Kg/m ;
Teneur en chlore.....	≤0.1 %;
Teneur en Na ₂ O.....	Eq≤2.5 %;
L'extrait sec.....	3.6±1.8 (%);
pH.....	5±1.

II.4.METHODE DE FORMULATION :

Plusieurs méthodes sont proposées pour la formulation des BAP . pour notre recherche on a utilisé une méthode simplifiée et largement utilisé dans la formulation des BO c'est la méthode de "Dreux-Gorisse". Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités.

Dans cette approche empirique [Dreux, Festa, 1995), les proportions des constituants granulaires du mélange sont déduites d'une courbe de référence OAB présentée par deux segments de droite dans le diagramme granulométrique. Cette courbe représente la distribution optimale, sans le ciment (liant), qui conduit à la plus forte compacité granulaire.

II.4.1.Les données :

- f_{c28} : Résistance en compression à 28 jours
- La plasticité désirée mesurée par l'affaissement au cône d'Abraham (AC) pour avoir un béton peu plastique
- D: Dimension maximale des granulats en mm.
- Résistance nominale δn

II.4.2. Mode opératoire :

La résistance moyenne serait :

$$f_{c28} = \delta n + 15\% \delta n. \dots \dots (II - 1)$$

1- Dosage en ciment et en eau :

A partir de la formule ci-dessous on détermine le rapport C/E

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

$$f_{c28} = G \cdot \delta_c (C/E - 0.5) \dots \dots \dots (II - 2)$$

Avec :

- f_{c28} : résistance moyenne en compression désirée à 28 j en bars
- δ_c : Classe vraie du ciment (à 28 jours) en bars
- C: Dosage en ciment (en kg/m³)
- G: Coefficient granulaire : valeur tabulée en fonction de la qualité des granulats (Bonne ou courant, excellente, passable) et de la dimension D des gros granulats; les valeurs approximatives de G supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).
- E: Dosage en eau sur matériaux secs (en litres pour 1 m³ de béton)

Le dosage en ciment est tiré de l'abaque en fonction de C/E et A. (voir abaque Annexe II-1).

Ayant fait le choix du dosage en ciment C, on calcule alors le dosage approximatif Du l'eau (E)

2-Dosage en granulat :

Les proportions des constituants granulaires du mélange sont déduites d'une courbe de référence OAB. Le point O (origine) a pour coordonnées [X₀=0,08 mm, Y₀=0 % passant].

Le point B (extrémité) a pour coordonnées [X_B=D_{max}, Y_B=100 % passant] (avec D_{max} la taille du plus gros granulat).

Le point A (brisure de la courbe) a pour coordonnées [X_A=D_{max}/2 et Y_A = 50 - D+ K+ K_s +K_p]. Les valeurs de K, et K_p sont donnés à partir de tableaux (voir Tableau Annexe III-2) ou d'abaques associés à la méthode. La valeur de K_s= 6 Mf - 15

. La projection sur l'axe des tamisât des points d'intersection entre les lignes reliant le point 95 % des passants d'un granulat au point 5 % des passants du granulat suivant et la courbe granulaire de référence permet de lire les quantités (g_i) en pourcentage de chaque fraction de granulaire (sable et gravier).

Le volume total des granulats

$$V = 1000 \gamma - V \dots \dots \dots (II - 3).$$

Avec :

- γ : coefficient de compacité qui est fonction de D max, de la consistance et du moyen du serrage.

Les volumes de chaque granulat sont donnés par l'expression suivante :

Chapitre II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODE DE FORMULATION

$$V_i = g_i \cdot V \dots\dots\dots (II - 4).$$

Avec :

- V_i : Volume du granulat en (Kg/m³ de béton).
- g_i : Pourcentage du granulat tiré du graphique %).
- V : Volume total des granulats (m³).

Les masses de chaque granulat sont donnés par l'expression suivante :

$$M_i = V_i \cdot \rho \dots\dots\dots (II - 5).$$

M_i : La masse du granulat en (Kg)

Avec :

- V_i : Volume du granulat en (Kg/m³ de béton)
- ρ : La masse Volumique absolue du granulat en (Kg/m³ de béton).

II.5. CONCLUSION :

Ce deuxième chapitre a été consacré en premier lieu à l'étude des propriétés générales des matériaux utilisés dans la formulation des bétons d'étude afin de mettre en évidence leur influence sur les propriétés du mélange à l'état frais et l'état durci. En second lieu, il est consacré à la méthode de formulation utilisée pour la détermination des différents constituants utilisés pour ces bétons.

Chapitre III

METHODES EXPERIMENTALES

III.1 INTRODUCTION :

Les connaissances acquises depuis l'apparition des BAP et la meilleure maîtrise de toutes les étapes (formulation , fabrication , mise en œuvre et contrôle) sont suffisantes pour permettre l'utilisation de ces bétons dans de nombreuses applications. Certaines points restent cependant à améliorer pour en étendre l'emploi .

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire. Son ouvrabilité se décline classiquement suivant : sa mobilité en milieu non confiné sa mobilité en milieu confiné et sa stabilité.

Nous avons choisi de présenter différemment les caractéristiques des BAP et d'aborder la complexité du matériau selon ses trois principales caractéristiques :

- La fluidité
- L'homogénéité
- La robustesse

En plus de la capacité à se compacter de lui-même (sous son poids propre), les propriétés les plus importantes pour la mise en œuvre du BAP sont la fluidité , la viscosité , et la résistance envers la ségrégation.

III.2. CALCULS DE LA COMPOSITION DES BETONS :

III.2.1. BETON DE REFERENCE BAPR (BAP TEMOINS) :

➤ **Données :**

- La résistance nominale $\sigma'n = 25$ Mpa
- Diamètre maximale des granulats $D_{max} = 15$ mm
- $E/L_{equi} = 0.5$

➤ **Détermination des dosages des constituants du béton de référence BAP R 100% sable siliceux :**

- La résistance moyenne à 28j $\sigma'_{28} = 28.75$ Mpa ;
- D'après C/E et AC de l'abaque (ANNEX 4) on trouve la quantité de ciment $C = 400$ kg/m³
- Le dosage en en eau : $E = 221$ l/ m³ de béton
- Tracé de la courbe de référence OAB : $XA = 8$ $YA = 54.8$

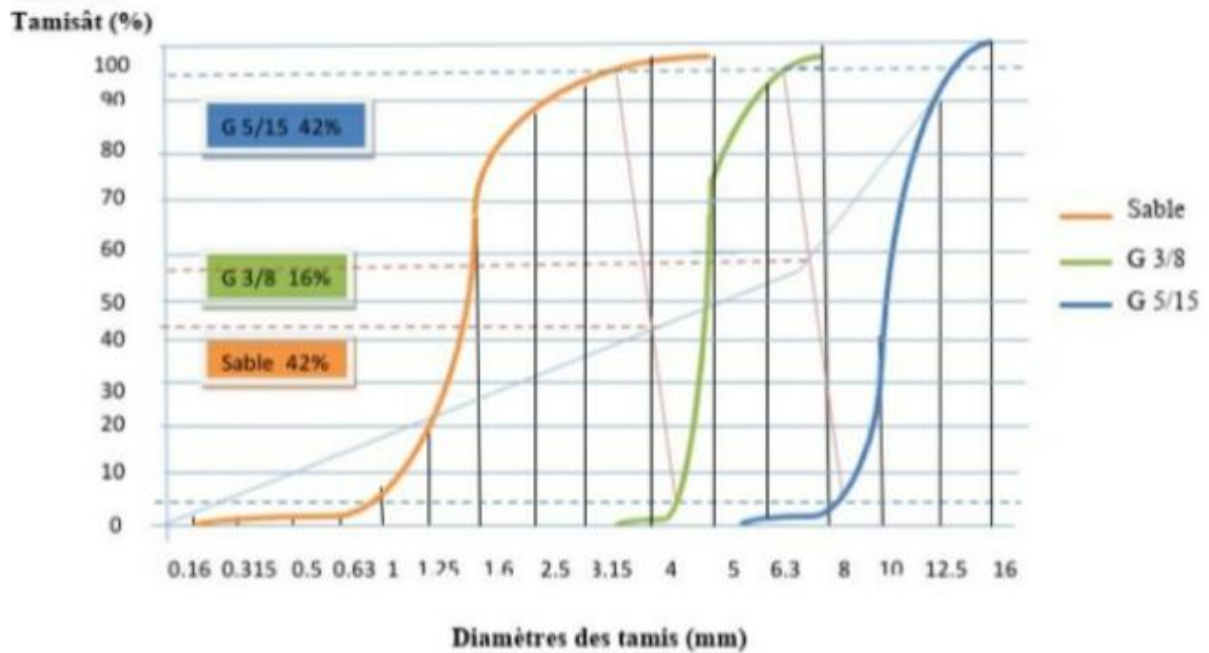


Figure III.1 : Courbes granulométriques de composition de BAPR

- 42% des granulats sable , 16% de gravillon , 42% de gravier
- Le volume absolu de l'ensemble des granulats $V_T = 682.3 \text{ l}$
- Les dosages des granulats sont calculés selon les proportions données par le graphe

(Figure III.1)

➤ **Composition du béton de référence :**

La composition du béton de référence est donnée au tableau III.1 .

Tableau III.1 : Composition du béton autoplaçant de référence BAPR

Constituants	Ciment	Eau	Sable	Gravillon	Gravier
Dosage, kg/m ³	400	222.5	781.85	195.77	642.5

Chapitre III : METHODES EXPERIMENTALES

Tableau III.2 : Différentes compositions utilisées dans la recherche :

Type des Bétons	BAP avec des différents pourcentages de laitier granulé	Module de finesse
BAPR	Béton autoplaçant 100% Sable siliceux	2.5
BAP1	Béton autoplaçant 25% laitier granulé et 75% sable siliceux	2.6
BAP2	Béton autoplaçant 50% laitier granulé et 50% sable siliceux	2.7
BAP3	Béton autoplaçant 75% laitier granulé et 25% sable siliceux	2.87
BAP4	Béton autoplaçant 100% laitier granulé	2.5

III.2.2. BETON D'ETUDE (BAP) :

✓ **Donnés :**

Les bétons d'étude ont :

- Le même squelette granulaire que le béton de référence
- Un dosage en laitier granulé de 25% , 50% , 75% et 100% substitué en volume de sable
- Un rapport E/Léq = 0.5

✓ **Objectifs :**

Garantir les critères d'autoplaçance :

- Un étalement qui s'inscrit dans la plage normalisée (SF=550 à 850) mm
- Une stabilité suffisante (SR<15%)
- Un taux de remplissage (PL> 0.8)
- Une résistance mécanique au moins égale à celle d'un béton ordinaire
- Une durabilité égale ou supérieure à celle d'un béton ordinaire

La norme NF EN 206-1 définit les modalités de prise en compte des additions :

$$Léq = C + K.A \text{ (III.1)}$$

Avec :

Léq : Liant équivalent(kg/m³)

C : Quantité de ciment (kg/m³)

A : Quantité d'addition (kg/m³)




K : Coefficient de prise en compte de l'addition (voir tableaux Annexe I.1 et 2)

Chapitre III : METHODES EXPERIMENTALES

Pour notre cas :

- $K=0.25$ pour les fillers calcaire

Tableau III.3 : Optimisation du dosage en fillers calcaire :

Essai N°	Dosage de fillers calcaire	L'étalement	Représentation d'observation photographique	L'observation
1	160	85		Ressuage et amoncellement des granulats
2	170	82		ressuage et amoncellement des granulats
3	180	76		Aucun ressuage répartition uniforme des granulats

III.2.2.1 COMPOSITION BAP 1 (25% laitier granulé et 75% sable siliceux) :

➤ Détermination des dosages des constituants du BAP1 :

- La résistance moyenne à 28j $\sigma'_{28} = 28.75$ Mpa ;
- D'après C/E et AC de l'abaque (ANNEX 4) on trouve la quantité de ciment $C = 400$ kg/m³
- Le dosage en eau : $E = 221$ l/ m³ de béton
- Tracé de la courbe de référence OAB : $XA = 8$ $YA = 54.8$

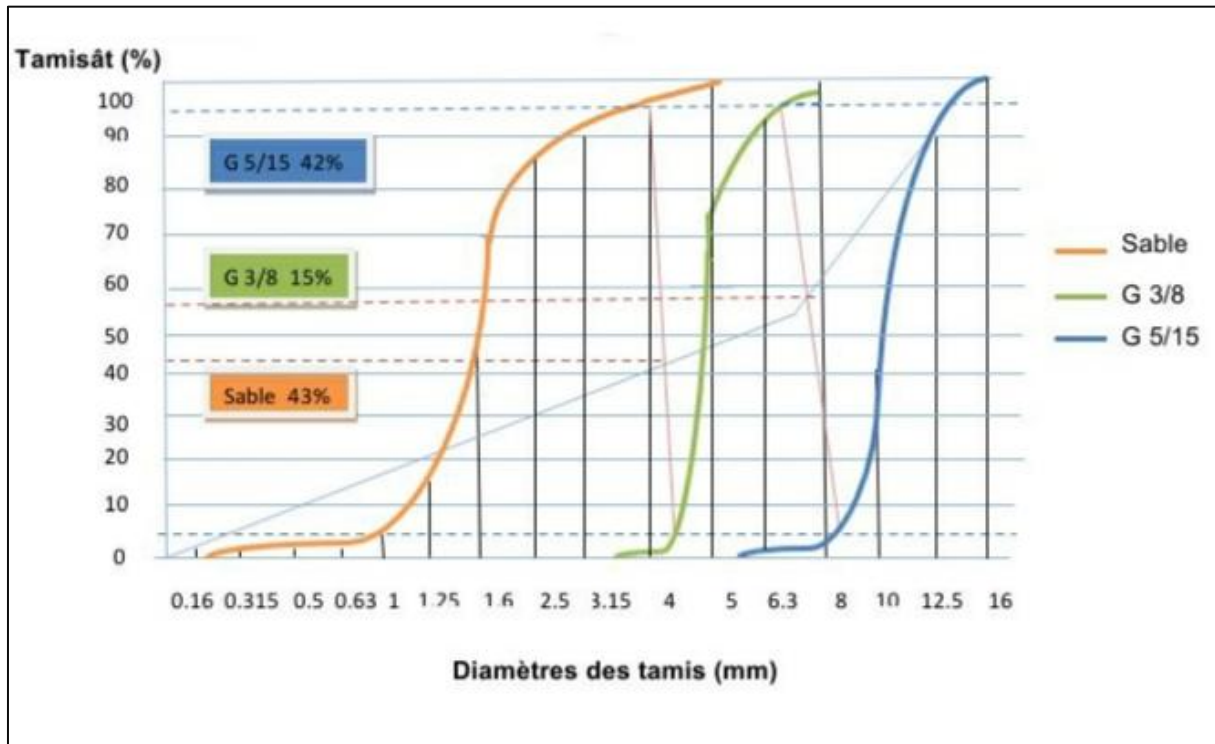


Figure III.2 : méthode graphique de composition des granulats (composition BAP 1)

- 43% des granulats sable , 15% de gravillon , 42% de gravier
- Le volume absolu de l'ensemble des granulats $V_T = 682.3 \text{ l}$
- Les dosages des granulats sont calculés selon les proportions données par le graphe

(Figure III.2)

III.2.2.2 COMPOSITION BAP 2(50% laitier granulé et 50% sable siliceux) :

➤ **Détermination des dosages des constituants du BAP2 :**

- La résistance moyenne à 28j $\sigma'_{28} = 28.75 \text{ Mpa}$;
- D'après C/E et AC de l'abaque (ANNEX 4) on trouve la quantité de ciment $C = 400 \text{ kg/m}^3$
- Le dosage en eau : $E = 227.5 \text{ l/m}^3$ de béton
- Tracé de la courbe de référence OAB : $X_A = 8$ $Y_A = 56.5$

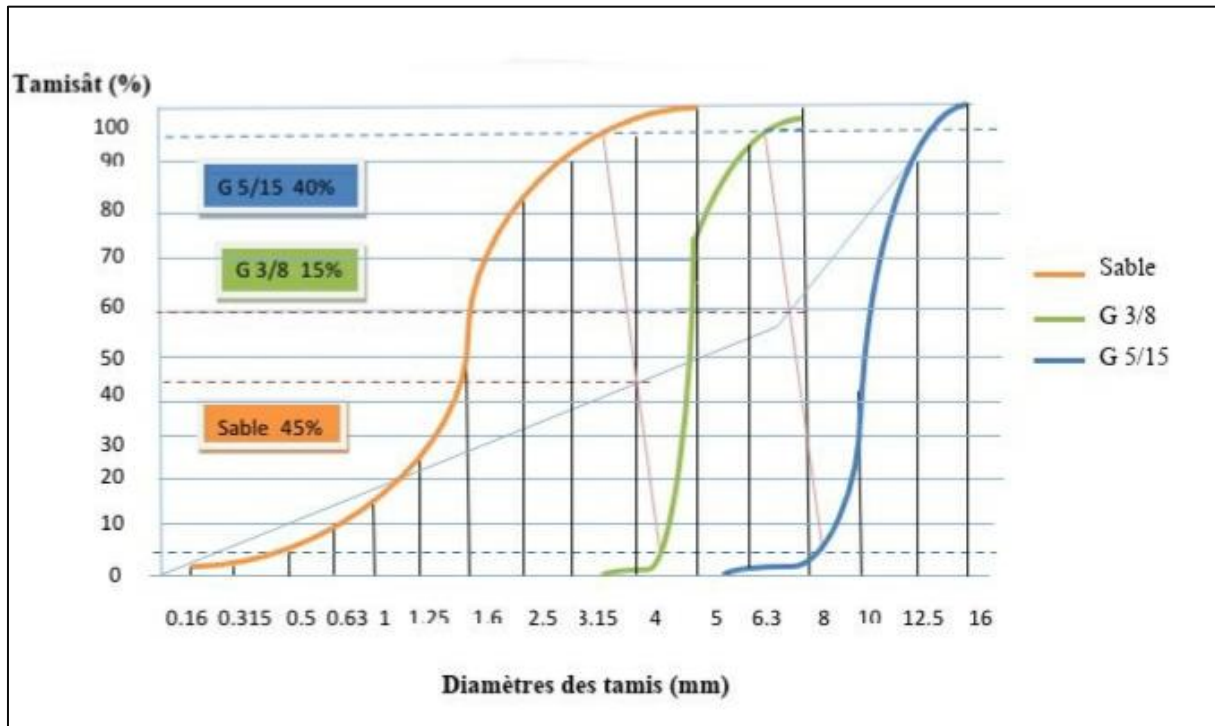


Figure III.3 : méthode graphique de composition des granulats (composition BAP 2)

- 45% des granulats sable , 15% de gravillon , 40% de gravier
 - Le volume absolu de l'ensemble des granulats $V_T = 682.3 \text{ l}$
 - Les dosages des granulats sont calculés selon les proportions données par le graphe
- (Figure III.3)**

III.2.2.3 COMPOSITION BAP 3(75% laitier granulé et 25% sable siliceux) :

➤ Détermination des dosages des constituants du BAP 3 :

- La résistance moyenne à 28j $\sigma'_{28} = 28.75 \text{ Mpa}$;
- D'après C/E et AC de l'abaque (ANNEX 4) on trouve la quantité de ciment $C = 400 \text{ kg/m}^3$
- Le dosage en eau : $E = 227.5 \text{ l/m}^3$ de béton
- Tracé de la courbe de référence OAB : $X_A = 8$ $Y_A = 56.5$

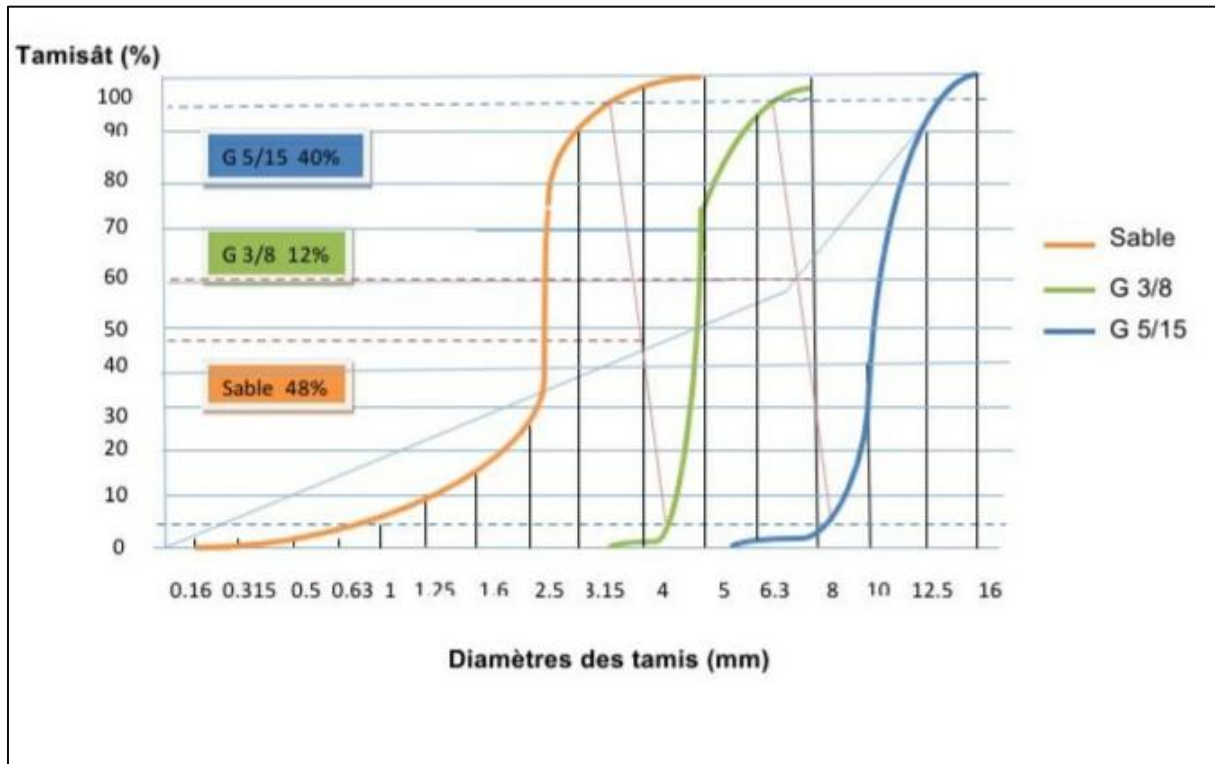


Figure III.4 : méthode graphique de composition des granulats (composition BAP 3)

- 48% des granulats sable , 12% de gravillon , 40% de gravier
- Le volume absolu de l'ensemble des granulats $V_T = 682.3 \text{ l}$
- Les dosages des granulats sont calculés selon les proportions données par le graphe

(Figure III.4)

III.2.2.4 COMPOSITION BAP 4(100% laitier granulé) :

➤ Détermination des dosages des constituants du BAP 4 :

- La résistance moyenne à 28j $\sigma'_{28} = 28.75 \text{ Mpa}$;
- D'après C/E et AC de l'abaque (ANNEX 4) on trouve la quantité de ciment $C = 400 \text{ kg/m}^3$
- Le dosage en eau : $E = 221 \text{ l/m}^3$ de béton
- Tracé de la courbe de référence OAB : $X_A = 8$ $Y_A = 57.6$

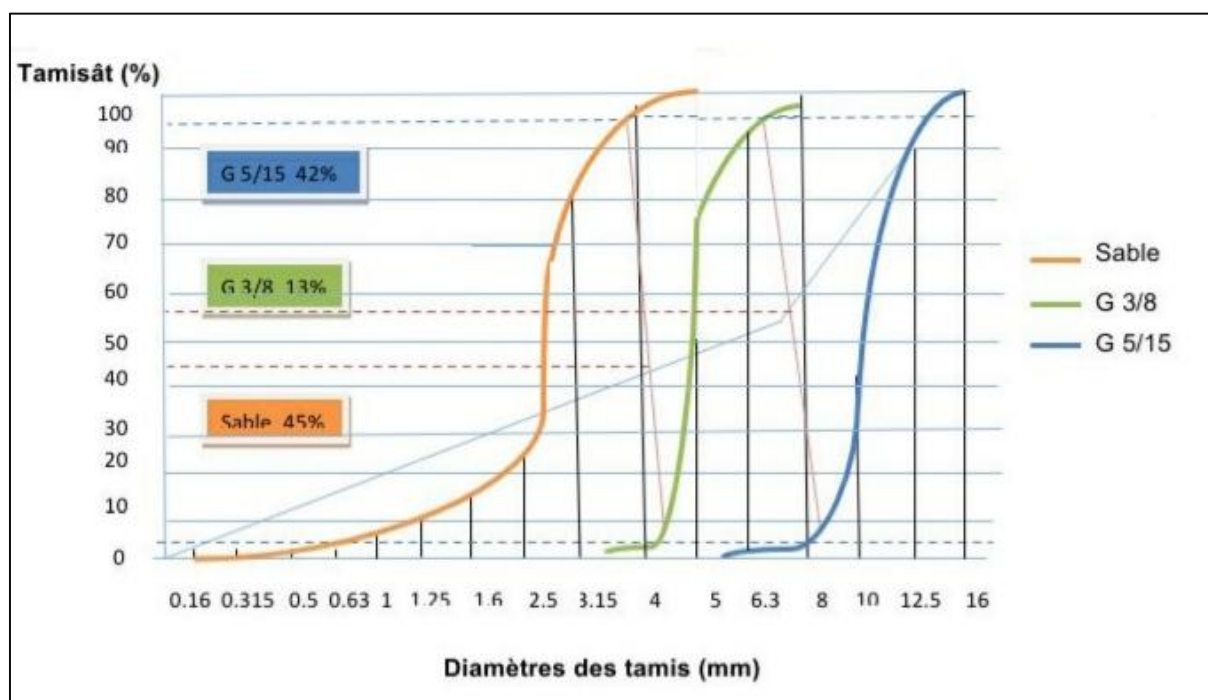


Figure III.5 : méthode graphique de composition des granulats (composition BAP 4)

- 45% des granulats sable , 13% de gravillon , 42% de gravier
- Le volume absolu de l'ensemble des granulats $V_T = 682.3 \text{ l}$
- Les dosages des granulats sont calculés selon les proportions données par le graphe

(Figure III.5)

Tableau III.4. Récapitule les compositions des BAP d'étude retenues

Désignation	unité	BAPR	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4
Ciment	kg/m ³	400	400	400	400	400
Eau	L	222.5	225	227.5	227.5	230
E/Léq	/	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sable	kg/m ³	781.85	596.4	400.8	204.68	/
Laitier granulé	kg/m ³	/	130.72	288.61	442.12	790
Gravier (3/8)	kg/m ³	220	195.77	204	202.63	128.95
Gravier (5/15)	kg/m ³	642.5	657	666.67	699.35	650
Fillers calcaire	kg/m ³	180	200	220	220	235
superplastifiant	%	0.8	1	1	1.2	3

III.3.PREPARATION DES MELANGES :

Les constituants des bétons formulés sont malaxés dans une bétonnière électrique d'une capacité de 30 litres qui assure le mélange des constituants par simple rotation de la cuve , suivant un axe qui peut être horizontal ou légèrement penché . la durée totale du malaxage est de 5 minutes .

La séquence de malaxage des différents constituants est décrite comme suit :

1 min : introduction des constituants dans la bétonnière et malaxé a sec

2 min : introduction de 75% d'eau

2 min : introduction de 25% d'eau restante dans laquelle la totalité du superplastifiant est diluée

Séquence de réalisation des essais à l'état frais :

t_0 : après la fin du malaxage , un échantillon de 10 litres est récupéré de la bétonnière recouvert et conservé à l'abri de l'évaporation pendant 15 min pour l'essai de la stabilité au tamis .

$t_0 + 3\text{min}$: un essai d'étalement au cône d'abrams est effectué

$t_0 + 15\text{min}$: suite aux deux essais précédents , l'ensemble du béton avant de réaliser l'essai à la boîte en L

$t_0 + 18\text{min}$: les 15 min de repos finis , on réalise l'essai de stabilité au tamis

$t_0 + 21\text{min}$: pour finir , on réalise une mesure de la masse volumique

$t_0 + 30\text{min}$: une fois tous les essais effectués , on procède à un dernière-malaxage de 30sec , avant la mise en place du béton dans les moules d'éprouvette pour les essais à l'état durci .

la forme des éprouvette est cubique de dimension $(10 \times 10 \times 10)$ cm³ pour les essais de compression , et des éprouvettes cylindriques de dimension (11×22) pour les essais de fendage et pour observer la réparation des granulats dur la hauteur de l'éprouvette .

III.4.ESSAIS DE CARACTERISTIQUE DU BETON AUTOPLACANTS A L'ETAT FRAIS :

Dans la suite du document seront présentés les essais normalisés par la norme NF EN 206-1.

Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP :

1 - Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'abrams)

2 - Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L)

3 - Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis

III.4.1 ESSAI D'ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS [NFEN12 350_8] :

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'abrams (essai d'étalement ou slump flow). Des valeurs cibles de l'ordre de 550 à 850 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP .

La valeur cible d'étalement doit être définie en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre . Cet essai caractérise la mobilité du BAP en milieu non confiné.

➤ **Matériels Nécessaires :**

- plateau de forme carré d'au moins 90 cm de coté .
- Cône d'abrams disposant d'un empattement à sa base afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur .
- Mètre ou règle de 90 cm .

➤ **Mode Opérateur :**

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal .
- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
- Placer et centrer le cône d'abrams (humidifié) sur le plateau .
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue , jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir , araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide .
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées .
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table , mesuré (au centimètre le plus proche) le diamètre final (D final) sur deux cotés perpendiculaires .
- Examiner le resultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenue , en arrondissant au centimètre supérieur.



Figure III.6 : Etalement d'un BAP homogène , bonne répartition granulaire

III.4.2 ESSAI DE LA BOITE EN L [NF EN 12 350-10] :

Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures. La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte , puis en levant une trappe à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre de barre est de 3 et le diamètre est de 14 mm), l'essai consiste à vérifier la mobilité en milieu confiné du BAP et son aptitude à traverser une zone fortement armée . Après écoulement du béton , on mesure la différence de l'hauteur dans la partie verticale (H1) et horizontale (H2).

Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage $H2/H1$. Une valeur de ce rapport supérieur à 0.8 traduit un bon écoulement.

➤ Matériels Nécessaires :

- Boîte en L



Figure III.7 : Boîte en L

➤ Mode Opérateur :

La boîte en L est une boîte en acier avec deux parties , l'une verticale et l'autre horizontale , séparées par une trappe et une grille de deux ou de trois barres de diamètre et d'espacement fixé . l'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- Remplir la partie verticale de la boite en L
- Attendre 3 minutes avant de soulever la trappe , le béton s'écoule à travers la grille .
- Mesurer les hauteurs de la partie verticale H1 et la partie horizontale H2
- Calculer le rapport H1/H2 , ce rapport correspond au taux de remplissage .



Figure III.8 : Essai à la boîte en L

III.4.2 ESSAI DE DTABILITE AU TAMIS :

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP , qui doit être stable sous l'effet de la gravité . il consiste à déverser une quantité de béton (4,8 KG) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm

Le pourcentage en poids de laitance ayant traversé le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité de béton . ce rapport doit être inférieur 15%

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation . il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire , ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier .

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité , en milieu confiné ou non , en caractérisant la stabilité .

➤ **Materiel Necessaire :**

- Tamis de 5 mm + fond
- balance

➤ **Mode Operatoire :**

L'essai se déroule en suivant les etapes suivantes :

- remplir un seau de 10L avec le béton
- le laisser reposer 15 minutes
- verser la partie supérieure (4,8 KG de béton) sur le tamis depuis une hauteur de 50 cm
- attendre 2 min puis peser la laitance qui est passée au travers le tamis
- calculer le pourcentage de laitance en divisant la masse de la laitance par la masse initiale du béton



Figure III.9 : Essai de stabilité au tamis pendant les deux minutes d'attente

III.5. LA MASSE VOLUMIQUE DU BETON AUTOPLACANT :

Après le nettoyage , les éprouvettes sont pesées avec une erreur inférieure à 1/1000. La masse volumique est alors calculée en divisant la masse sur le volume de l'éprouvette. C'est-à-dire :

$$\rho = M/V$$

III.6.ESSAI DE CARACTERISATIONS DU BETON AUTOPLACANT A L'ETAT DURCI :

III.6.1. : ESSAI MECANIQUE :

III.6.1.1 : ESSAI DE COMPRESSION :

L'essai de résistance à la compression a été sur des éprouvettes cubiques grâce à une presse hydraulique de capacité maximale de 50 tonnes. L'éprouvette est centrée dans les plateaux de presse hydraulique à vitesse constante.

L'essai de compression est conduit jusqu'à la rupture de l'éprouvette . Les résultats obtenus à 7 . 14 et 28 jours proviennent de moyenne des 3 échantillons.

La résistance à la compression est calculée selon la forme suivante :

$$\sigma = P/S(\text{MPa})$$

P : l'effort de rupture S : la section d'éprouvette



Figure III.10 : Essai de compression

III.6.1.2 : ESSAI DE TRACTION PAR FENDAGE :

L'essai de traction par fendage a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques selon les étapes suivantes :

- Placé l'éprouvette et les bandes de chargement entre les plateaux de la presse (horizontalement).
- Appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs. La vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai et égale à 240 Kn/mm.
- Retenir pour charge de rupture la charge maximale enregistrée au cours d'essai et calculer à 0.1 (MPa) après la résistance correspondante σ en (MPa)

La résistance sera : $\sigma = 2P/\pi dh$ en (MPa)

P : est la charge maximale en N

d : le diamètre d'éprouvette en mm

h : la hauteur de l'éprouvette en mm



Figure III.11 : Essai traction par fendage

Chapitre III : METHODES EXPERIMENTALES

Les résultats des méthodes expérimentales sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.5. Récapitulé des résultats des méthodes expérimentales :

		BAP R (100% sable siliceux)	BAP 1 (25% LG)	BAP 2 (50% LG)	BAP 3 (75% LG)	BAP 4 (100%LG)
Module de finesse		2.5	2.6	2.7	2.87	2.5
Filer calcaire (kg/m ³)		180	200	220	235	235
Superplastifiant(%)		0.8	0.8	0.8	1	3
Étalement au cône d'Abrams (cm)		76.3	75.4	73.1	72.5	65.6
T 500 (s)		1.77	1.84	1.87	1.92	2.5
Taux de remplissage		0.97	0.95	0.92	0.91	0.88
Stabilité au tamis (%)						
Masse volumique		2.49	2.45	2.43	2.4	2.38
Résistance à la compression	7 jours	19.92	23.50	26.07	27.33	29.88
	14 jours	26.31	28.01	32.18	36.06	37.94
	28 jours	32.7	34.9	36.5	38.2	41.02
Résistance à la traction par fendage	28 jours	3.01	3.21	4.16	4.57	4.88

III.7 : CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous allons résumer les essais réalisés sur les bétons autoplaçants formulés à l'état frais (l'étalement , boîte en L , stabilité au tamis) et à l'état durci (résistance à la compression , résistance à la traction).



Chapitre IV
RESULTATS ET ANALYSES

IV.1 INTRODUCTION :

Après avoir formulé les BAP avec plusieurs dosages de substitution de sable siliceux par le laitier granulé, il est donc nécessaire de mener une série d'essais pour leurs caractérisations et voir l'influence de sable de laitier granulé sur les principaux paramètres d'autoplaçance des BAP à l'état frais et sur les résistances mécaniques des bétons à l'état durci

Cinq compositions ont été caractérisées : BAPR, BAP1, BAP2, BAP3 et BAP4 avec une substitution de sable siliceux par un sable de laitier granulé à des dosage respectivement de 0%, 25%, 50%, 75%et 100%

IV.2.CARACTERISATION DES BAPA L'ETAT FRAIS

IV.2.1. ESSAI D'ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS (SLUMP FLOW)

L'essai d'étalement au cône d'Abrams caractérise la mobilité du BAP en milieu non confiné. Il permet de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier.

Les résultats obtenus etprésentés sur la figure IV.1 montrent que l'étalement des bétons se situe entre 55 et 85 (cm) et qui vérifient bien les exigences de la norme 206-1

D'après le graphe on remarque que le diamètre d'étalement diminue avec l'augmentation de pourcentage de laitier granulé malgré l'augmentation de dosage en addition.

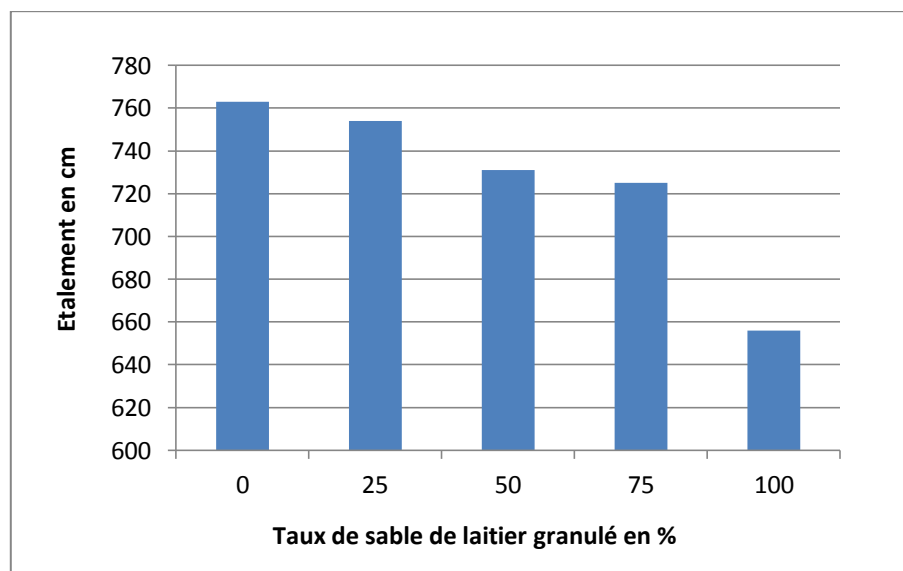


Figure IV-1. Influence du dosage en laitier granulé sur l'étalement

Par ailleurs, lors de l'expérimentation, on remarque aussi que le diamètre d'étalement pour le dosage 100% de laitier granulé diminue malgré qu'on a augmenté le dosage en superplastifiant jusqu'à 3% dosage de saturation.

Dosage en addition de fillers calcaire

Chapitre IV : RESULTATS ET ANALYSES

Pour le dosage en addition, la figure IV.2, montre bien que l'augmentation de taux de substitution de sable siliceux par le sable de laitier granulé nécessite une augmentation de dosage en filler calcaire et qui dépassent même le dosage prescrit par la norme 206-1 (220Kg/m^3) et cela est dû à la rugosité de la surface des granulats de laitier

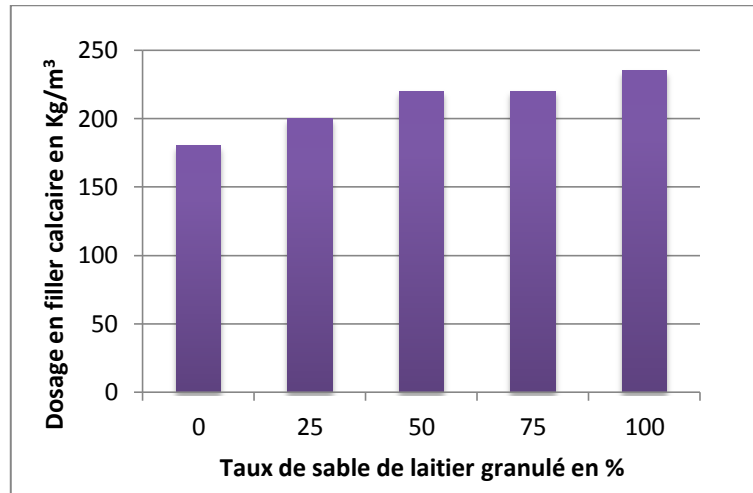
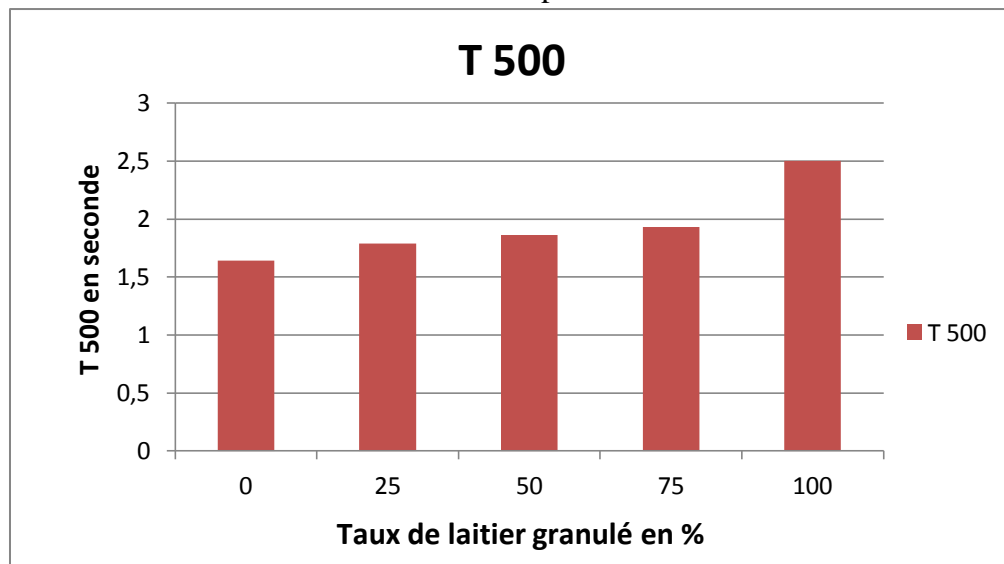


Figure IV-2 :Influence taux de sable de laitier granulé sur le dosage en addition

IV.2.2. ESSAI DU T_{500}

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton, cet essai est réalisé conjointement avec l'essai d'étalement.

L'évolution du T_{500} des BAP pour différents dosages est présentée sur la figure IV.3. Les résultats obtenus montrent une légère augmentation du T_{500} avec l'accroissement du taux de sable de laitier granulé résultant de l'insuffisance de la quantité des fines qui enrobe les granulats de laitier en traduisant ainsi leur mauvais déplacement.



Chapitre IV : RESULTATS ET ANALYSES

Figure IV_3 : Influence taux de laitier granulé sur le temps d'écoulement T 500

IV 2.2.ESSAI DE LA BOITE EN L (LBOX)

L'aptitude à l'écoulement d'un béton est associée à sa capacité à s'écouler de manière homogène dans des zones à fort ferrailage

Afin de vérifier cette caractéristique, l'essai de la boîte en L avec une configuration à trois barres a été appliqué pour tous les mélanges.

Les résultats obtenus et présentés sur la figure IV.4 montrent que le taux de remplissage se situe bien dans l'intervalle prescrit par la norme 206-1

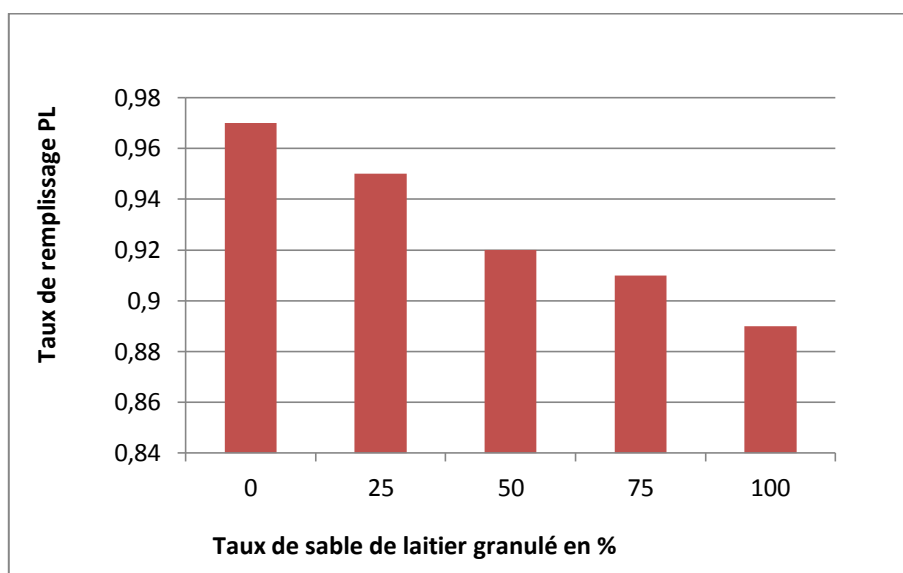


Figure IV.4 : Influence du dosage en laitier granulé sur l'écoulement

Le graphe montre qu'avec l'augmentation de dosage en laitier granulé le mélange provoque une diminution de la mobilité du béton en milieu confiné et surtout pour le dosage 100% de laitier granulé, ce qui peut être expliqué par le fait que le pourcentage d'addition de fillers calcaire restent insuffisant pour entraîner les gros granulats et assurer un taux de remplissage proche de 1.

IV 2.3. ESSAI DE LA STABILITE AU TAMIS :

Cet essai vise à qualifier les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation.

Les résultats obtenus présentés sur la figure IV.5 montrent que les compositions testées ont une stabilité satisfaisante $SR < 20\%$.

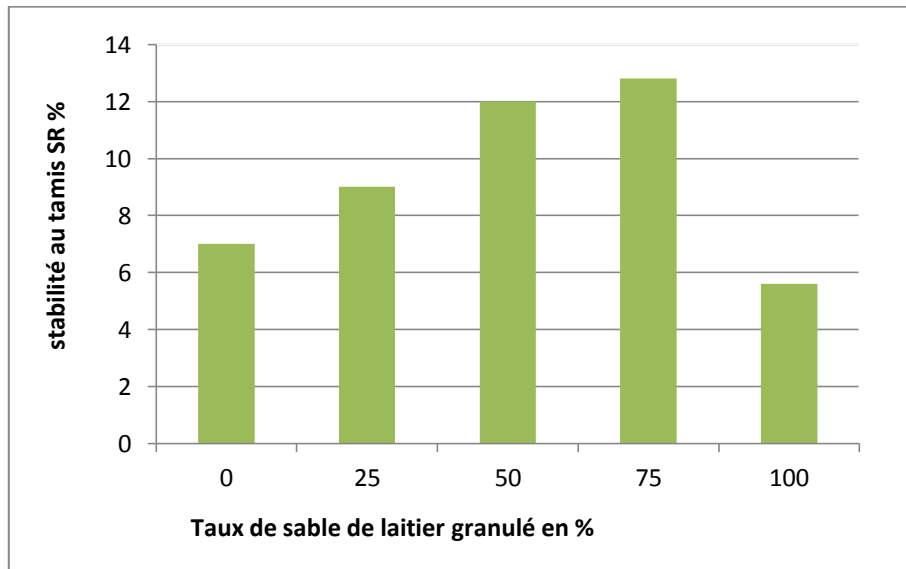


Figure IV.5 : Influence du dosage en laitier granulé sur la stabilité au tamis

Cependant le graphe montre que pour le dosage de 100% de laitier granulé, le BAP4 se caractérise par une stabilité proche du domaine critique de l'ordre de 5%, donc il a une grande viscosité, ce qui se traduit par une difficulté d'écoulement, conduisant à un mauvais remplissage des coffrages.

IV 2.4.MASSE VOLUMIQUE DES BETON FRAIS :

Les résultats obtenus et représentés sur la figure VI.6 montrent que la masse volumique diminue avec l'augmentation de dosage de laitier granulé par ce que c'est un matériau poreux

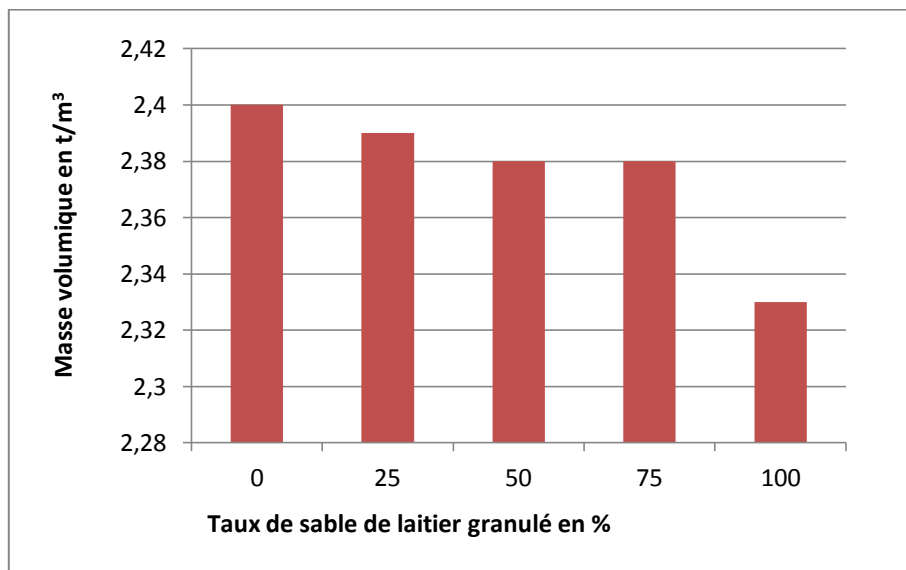


Figure IV.6 : Influence du dosage en laitier granulé sur la masse volumique

IV.3.CARACTERISATION DES BAPA L'ETAT DURCI.

Après avoir mis en évidence les compositions des BAP par la validation des paramètres d'autoplaçance, nous abordons dans cette partie les propriétés mécaniques de ces bétons. Afin de mettre en évidence l'influence de laitier granulé sur les performances mécaniques des BAP, une série d'essais mécaniques, a été réalisée.

Douze éprouvettes pour chaque composition, ont été réalisées pour les essais mécaniques. Trois ont été testées en compression aux échéances de 7, 14, 28 jours et trois en flexion par fendage à 28 jours

IV.3.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION

Il est utile de rappeler qu'on a opté pour un rapport E/L_{eq} constant ce qui a entraîné un dosage en eau croissant parallèlement au dosage en addition, voir tableau chapitre V

Les résultats présentés sur la figure IV.7 montrent qu'à 7 jours de durcissement l'influence de laitier granulé sur la résistance à la compression est très remarquable, on remarque qu'à 100% de sable de laitier granulé, la résistance à la compression a doublé par rapport au béton témoins à 0% de sable de LG

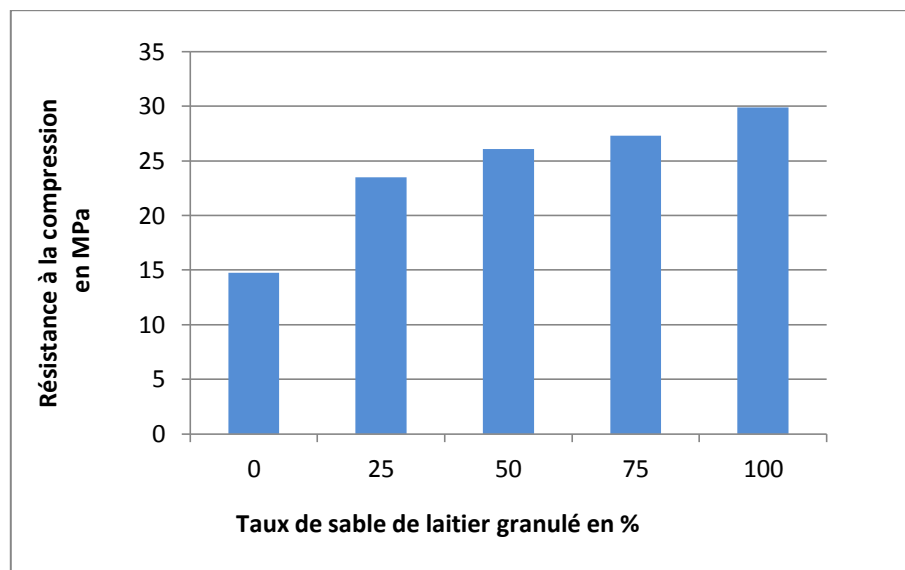


Figure IV.7 :influence de sable de laitier sur résistance à la compression à 7 jours

A 14 jours on remarque aussi sur le graphe IV.8 que les résistances sont considérablement améliorées, et pour les BAP de 50%, 75% et 100% les résistances sont augmentées de 60 à 70%

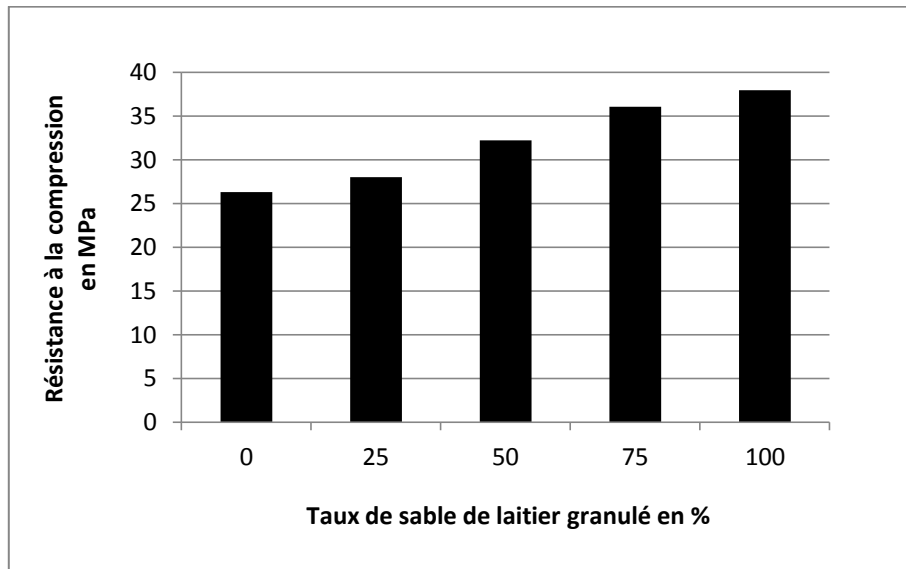


Figure IV.8 :influence de sable de laitier sur résistance à la compression à 14 jours

Pour les résistances à la compression à 28 jours les résultats de la figure IV.9 montrent qu'elles sont aussi améliorées et on peut dire que l'amélioration est aussi considérable parce qu'elle dépasse les 25%

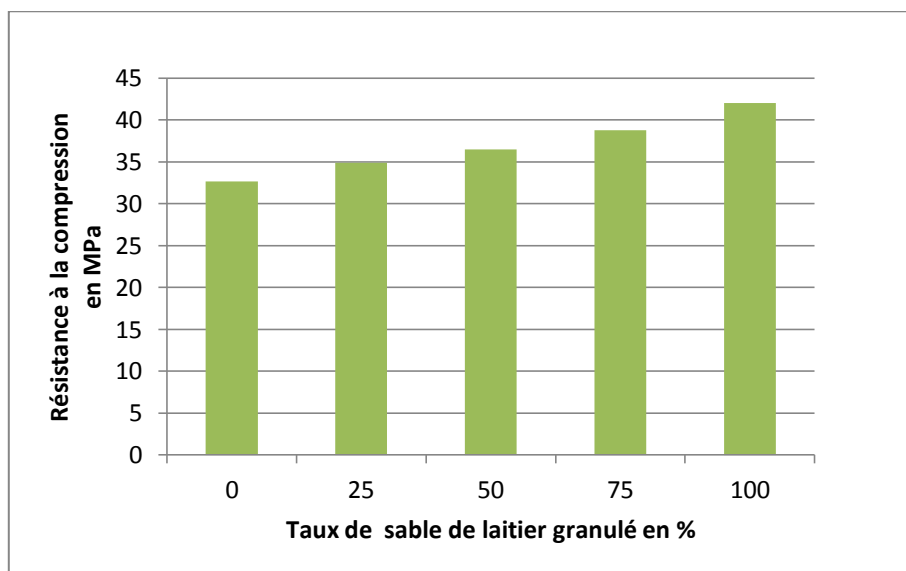


Figure IV.9 :influence de sable de laitier granulé sur résistance à la compression 28 jours

La figure IV.10 récapitule les résistances aux différentes échéances de tous les bétons d'étude et montre bien l'évolution des résistances

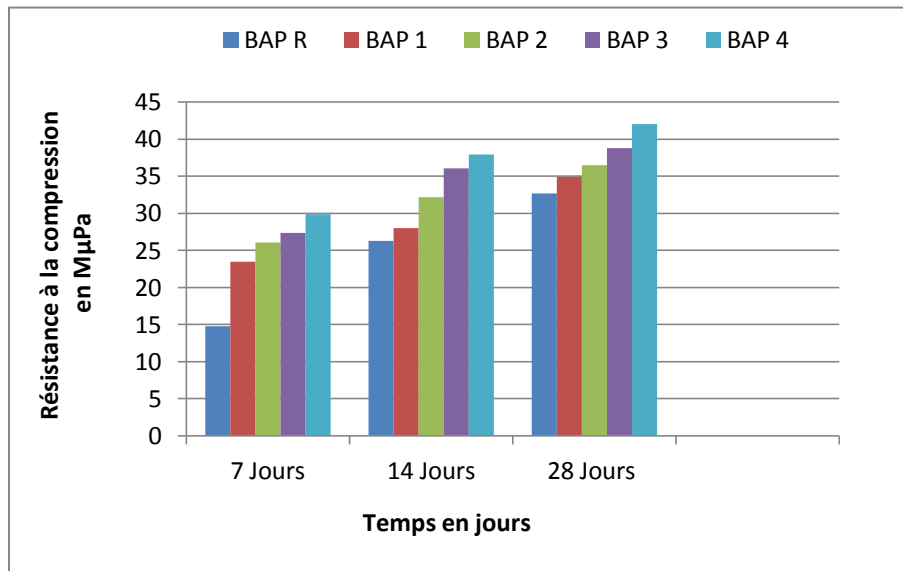


Figure IV.11. Cinétique de durcissement des différents BAP

IV.3.2. RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE

Les résultats obtenus sur les résistances en flexion des BAP sont présentés sur les figures IV.12 montrent les mêmes remarques que celles avancées sur la résistance à la compression, donc une bonne amélioration des résistances à 28 jours. On remarque bien qu'elle dépasse les 80% pour le BAP4 avec 100% de sable de laitier granulé

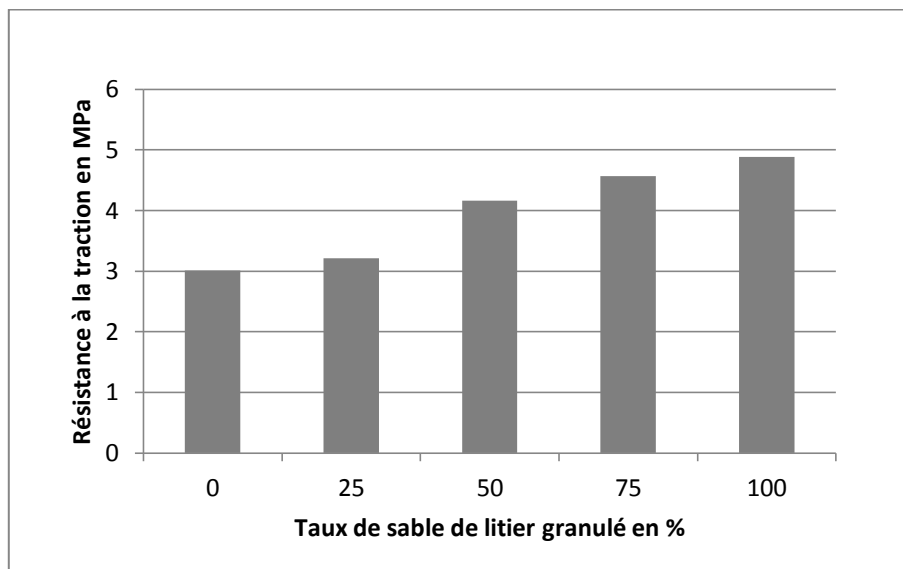


Figure IV.12:influence de sable de laitier granulé sur résistance à la traction 28 jours

IV. 3.3. VERIFICATION DE L'ABSENCE DE SEGREGATION

La vérification de l'absence de ségrégation sur béton frais est utile et nécessaire. Elle constitue une garantie de la bonne qualité du BAP. A l'état durci cette qualité doit être aussi vérifiée et voir qu'après sa mise en œuvre le BAP ne présente pas un volume de pâte qui flotte sur les granulats, celle effet, nous avons préparé des éprouvettes en béton durci scie en deux et on a observé les sections suivant le sens du coulage pour se renseigner sur la répartition des granulats.

L'observation de la répartition granulaire du béton autoplaçant sur la figure IV.12, nous montre une distribution homogène du squelette granulaire dans tout le volume de l'éprouvette



FigureIV.10 : Observation de la répartition granulaire du BAP

IV. 5. CONCLUSION :

Ce dernier chapitre est consacré aux résultats et analyses obtenus lors de cette étude.

Du point de vue caractérisation des bétons à l'état frais et à l'état durci, cette partie de notre étude nous a permis de mettre en évidence la possibilité d'employer le laitier granulé comme sable et voir son influence aussi bien sur le béton frais que sur le béton durci.

- A l'état frais

La vérification des paramètres d'autoplaçance pour les BAP d'étude était un peu difficile à accomplir lorsqu'on prenait le même dosage en addition de filler de calcaire que pour le BAPR et c'est pourquoi, lorsqu'on augmentait le taux de substitution de sable siliceux par le sable de laitier granulé on était obligé d'augmenter le dosage en addition de filler calcaire. Donc on peut dire que la substitution du sable siliceux par le laitier granulé présente une réduction de la rhéologie des béton autoplaçants.

- A l'état durci

On peut conclure que l'incorporation de laitier granulé comme sable dans les bétons leurs permet avoir un gain de résistance en compression qui atteint 100% jeune âge. (7jours) et qui dépasse les 25% à 28 jours, et pour la résistance en traction l'augmentation est très remarquable, parce qu'elle dépasse les 80%.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

La formulation d'un béton autoplaçant (BAP) pose de nombreux aléas en termes d'écoulement, de stabilité et de pouvoir de remplissage. Ces paramètres de formulation dépendent non seulement des méthodes de formulation, mais aussi de nature des matériaux.

De façon classique les BAP sont formulés le plus souvent avec des granulats naturels pour des raisons de disponibilité, d'économie et de qualité. Or il se trouve justement que les granulats naturels qui ne sont pas disponibles localement à cause de pineraie ou de qualité, c'est pourquoi la valorisation des déchets industriel est devenue indispensable et présente un impact majeur pour l'environnement, c'est dans ce contexte que notre travail s'inscrit

L'étude a montré que la valorisation des déchets industriels et notamment le laitier de haut fourneau d'EL HADJAR dans les bétons innovants et en particulier les bétons autoplaçants a apporté quelques réponses sur la possibilité d'introduire les laitiers cristallisé et granulé comme granulats dans la confection de ce type de béton, que ce soit pour avoir des bétons au laitier avec substitution de sable siliceux à des différent taux par le laitier granulé ou un béton tout laitier avec une substitution totale de sable siliceux par de laitier granulé

En effet le laitier est un sous-produit de l'élaboration de la fonte, peu valorisé, utilisé principalement comme remblai (laitier cristallisé) et utilisé dans la fabrication des ciment (laitier granulé). Son emploi dans le BAP peut être viable du point de vue économique et écologique.

Sur le plan technique les granulats de laitier se caractérisent par une morphologie rugueuse et une porosité ouverte.

Les résultats de l'étude expérimentale qui nous ont permet de réaliser des BAP avec des granulats artificiels(laitier cristallisé et granulé) comme gravier et sable, ont montré la possibilité de substituer les granulats naturels dans les bétons autoplaçants,

Les essais ont montré aussi que l'incorporation du laitier granulé en substitution partiel ou totale se traduit, premièrement par une diminution de la fluidité du béton à l'état frais nécessitant cependant une augmentation du dosage en adjuvant (superplastifiant) et en addition (filières calcaire), pour aboutir à une plus grande quantité de pâte, et garantir ainsi le caractère autoplaçant du béton, deuxièmement par une augmentation des résistances mécaniques du béton à l'état durci qui dépasse à 28 jours les 25% en compression et 80% en traction

Les résultats obtenus permettent d'ouvrir la voie pour l'emploi du laitier granulé comme sable et cristallisé comme granulat dans les bétons



**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] AFGC. Bétons Autoplaçants - Recommandations Provisoires. page 63, 2000.
- [2] NF EN 206-9, Juin 2010, page 6
- [3] Turcry Philippe, Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants : Influence de la formulation, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Février 2004.
- [4] Sedran Thierry, Rhéologie et Rhéométrie des Bétons. Application aux Bétons Autonivelants. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, mars 1999.
- [5] Khayat K.H, Les Bétons Autonivelants, Les Bétons : Bases et Données pour leur Formulation, Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques, Sous la Direction de J. BARON et J.-P. OLLIVIER, Edition Eyrolles, Paris, Troisième Tirage 1999.
- [6] M'HAMED I.M, BEN BRAHIM.O, «Durabilité du Béton Autoplaçant à base de sable de dune finement broyé vis-à-vis des attaques chimiques ». Mémoire de Master ACADEMIQUE. Université De Ziane Achour de Djelfa , 2016
- [7] Khélifa R., Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons, Thèse de Magistère en Génie Civil, Université Mentouri de Constantine, le 11 Juillet 2001.
- [8] Projet national de recherche 1 développement sablocrete « Béton de sable - caractéristique et pratiques d'utilisation » presses de l'école nationale des ponts et chaussées novembre 1994
- [9] http://ofrir.lcpc.fr/article_produit/19/4/752/produit_joined_file/fiche_LHF_critallise.PDF
- [10] ALEXANDRE.J, SEDILEAU.J.L, livre (le laitier de haut fourneau élaboration, traitement, propriétés emplois).
- [11] DREUX G. et FESTA J., Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8ème édition, Eyrolles, 1998.
- [12] Journée d'Information sur les Ciments, les Bétons et les Adjuvants, «Les adjuvants, définitions et opportunités d'utilisation», ERCE - CTC Est - GRANITEX, Alger, 2004.
- [13] CHOPIN D., Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons autoplaçants – Optimisation du temps de fabrication , Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Juin 2003.
- [14] BUL M, OLLIVIER J-P (1993), conception des bétons: structure poreuse, dans la durabilité des bétons. Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, p 106
- [15] M. NEHDI, Pourquoi certaines charges de carbonate de provoque une augmentation rapide de la viscosité dans dispersés à base de ciment, des matériaux Cement and Concrete Research, Vol 30 pp 1603-1669, juin 2000.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [16] MENAI KHALED, Etude de l'Effet d'Ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants, Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, CANADA, Septembre, 1995.
- [17] GHAZEL A. Modelisation Statique du Comportement des BAP et Optimisation, Mémoire de maitrise en génie civil, Université de Sherbrooke, pp 88-889, pp 155-156, 1999.
- [18] Mourad Behim ; Sous Produits Industriels Et développement Durable : Réactivité, → Rôle et Durabilité Des Laitiers D'El Hadjar Dans Les Matériaux a Matrice Cimentaire ; Université Badji Mokhtar –Annaba.
- [19] T. Sedran. Les bétons autonivelants (BAN) – Synthèse bibliographique. volume n o 196 of ref. 3889, pages 53–60. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Mars–Avril, 1995.
- [20] AFGC document scientifiques et techniques, juillet 2000
- [21] LEGRAND.C, « La structure des suspensions de ciment». Le Béton Hydraulique, Presses de l'ENPC, 1982.
- [22]<https://fr.scribd.com/document/372025138/Comportement-des-betons-autoplacants-ABASE-DES-FIBRES-PLASTIQUES>
- [23]Recommandation pour l'emploi des bétonautoplacant
- [24] SEDRAN T., « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.
- [25] Y. Msaad. Analyse des mécanismes d'écaillage du béton soumis à des températures élevées. In Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées / Institut Navier. 2005.
- [26] M. Sonebi and PJM. Bartos. Hardened scc and its bond with reinforcement. Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden :275–289, 1999.
- [27] F. De Larrard. Concrete mixture-proportioning - A scientific approach. Modern Concrete Technology Series, no 9 :E&FN SPON, 1999.
- [28] J. Pera, S. Husson, and B. Guilhot. Influence of finely ground limestone on cement hydration. Cement and Concrete Composites, Vol. 21 N°2 :99–105, 1999.
- [29] O. Petersson. Limestone powder as filler in self-compacting concrete - frost resistance and compressive strength. Proceeding of 2 nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan :277–284, 2001.
- [30] B. Felekoglu, M. Yardimci, and B. Baradan. A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete. Proceeding of 3 nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland :446–456, 2003.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [31] C. Shi, Y. Wu, Y. Shao, and M. Riefler. Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM Center :349–354, 2002
- [32] Y. Klug and K. Holschemacher. Comparison of the hardened properties of selfcompacting concrete and normal vibrated concrete. Proceeding of 3 nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland :596–607, 2003.
- [33] K. Holschemacher. Hardened material properties of self-compacting concrete. Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 10, no 4 :261–266, 2004.
- [34] S. Assié. Durabilité comparative des bétons autoplaçants et des bétons vibrés de même résistance mécanique. In XXIIIes Rencontres Universitaires de Génie-ivil, AUGC. 2005
- [35] B. Persson. A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the coresponding properties of normal concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 31, no 2 :193–198, 2001
- [36] E. Annerel, P. Taerwe, and P. Vandeveld. Assessment of temperature increase and residual strength of scc after fire exposure. Proceeding of 5 th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium :715–720, 2007.
- [37] H. Carré and A. Noumowé. BAP et BHP à haute température. Correspondance personnelle, Juillet 2004.
- [38] P. Turcry, E. Rozière, and A. Loukili. Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait de fissuration des bétons autoplaçants. XXIIIemes Rencontres Universitaires de Génie-Civil, Grenoble, 2005.
- [39] A. Pineaud. Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants et application à l'industrie de la préfabrication. In Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, page 271. 2007.
- [40] S. Koliass and C. Georgiou. The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 27, N°2 :211–216, 2005.
- [41] F. De Larrard and R. Le Roy. Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances. Materials and Structures, Vol. 25 :464–475, 1992.
- [42] G. Pons, E. Proust, and S. Assié. Creep and shrinkage of self-compacting concrete : a different behaviour compared with vibrated concrete Proceeding of 3 nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland :645–654, 2003.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [43] G. König, K. Holschemcher, F. Dehn, and D. Weiße. Self-compacting concrete time development of material properties and bond behaviour. Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Tokio, Japan :507–516, 2001.
- [44] Association française de Génie Civil (AFGC), Bétons Auto-Plaçants Recommandations provisoires, juillet 2002, 63 pages
- [45] Stéphan Assié, Round Table Des Bétons autoplaçants, ces doctorats De de l'institut nationale des Sciences Appliquées de Toulouse, octobre 2004,254 pages.
- [46] Shi et Al, Une étude de l'effet de poudres ultrafines sur la fluidité de la pâte de ciment, les transactions de l'Institut japonais de béton, 1998, vol20, pp 9-14.
- [47] Jacobs F. et F. Hunkhler, Conception de béton auto-compactant pour structures de béton durables, Actes du Colloque international sur la Première autocompactants béton, (PRO 7), Stockholm, Suède, pp 397-407, 1999.
- [48] Okamura Hajime Ouchi et Masahiro, béton auto-compactant, Journal de la technologie du béton avancée, vol, 1, n ° 1, 5-15, Avril 2003.
- [49] Okamura Hajime and Masahiro Ouchi, Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol, 1, No. 1, 5-15, April 2003.
- [50] Ferrari, de Larrard, les essais et la modélisation de la technologie du béton frais, le NIST, 1998, février, NISTIR 6094, 61 pages.
- [51] Sedran, Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants, 1999, thèse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 220 pages.
- [52] S. Nagataki et H. Fujiwara, auto-compactant la propriété du béton très fluide, deuxième CANMET / ACI Symposium international sur les progrès de la technologie du béton, Las Vegas, ACI SP 154-16, pp 301-314, Juin 1995.
- [53]<http://www.infociments.fr/betons/types/beton-autoplacant>
- [54] BENADDAD .S, BENATSOU. N, «Etude à la compression d'un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires) ». Mémoire de master.
- [55] Association française de Génie Civil (AFGC), Bétons Auto-Plaçants Recommandations provisoires, juillet 2002, 63 pages.
- [56] Fédération française du béton (FFB), Recommandations de mise en oeuvre des BAP et des BAN, SEBTP, édition 2003
- [57] Projet National BAP, Aide à la rédaction de cahier des charges Techniques pour le Bétons autoplaçants (BAP), Mars 2005.
- [58] TURCRY, Retrait et fissuration des bétons autoplaçants - influence de la Formulation, Thèse de doctorat de l'Ecole centrale de Nantes, 2004, 213 pages.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[59] WALRAVEN, Structural aspect of self-compacting concrete, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 15-22.

[60] SEDRAN T . « les bétons autonivelants – synthèse bibliographique », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 196 p53-60 Mars-Avril 1995.

[61] Arch. GieWollaert , Béton autoplaçant , 2005

[62] Tahar ALI-BOUCETTA. Contribution laitier granulé et la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances. Thèse de doctorat en génie civil. Université Badji Mokhtar Annaba. 2014.

[63] <https://www.eqiom.com/produits/betons/beton-autoplacant>

ANNEXE

مختار - عنابة

Université Badji Mokhtar-Annaba

ANNEXES



NA.5.2.5.2.1 Généralités

Le concept de coefficient k et de liant équivalent autorise la prise en compte des additions de type II et de certaines additions de type I :

- en remplaçant le terme «rapport eau/ciment» par celui de «rapport eau/(ciment + $k \times$ addition)», l'eau étant par définition l'eau efficace (voir 3.1.30 et NA.3.1.30) ;
- en remplaçant l'exigence relative au dosage minimal en ciment par la même exigence appliquée au liant équivalent.

Le liant équivalent est constitué de ciment de type CEM I 42,5 N ou CEM I 42,5 R ou CEM I 52,5 N ou CEM I 52,5 R et d'une des additions normalisées mentionnées ci-après à l'exclusion d'autres ciments ou d'autres additions.

Pour tenir compte des apports respectifs des constituants vis-à-vis de la durabilité, la quantité de liant équivalent est définie par la formule :

$$\text{Liant équivalent} = C + kA$$

où :

- C est la quantité de ciment par mètre cube de béton (en kg/m^3) ;
- A est la quantité d'addition par mètre cube de béton prise en compte dans le liant équivalent (en kg/m^3) et dont la valeur maximale est définie par le rapport $A/(A + C)$ précisée dans le Tableau NA.F.1 pour les différentes classes d'exposition. Si une plus grande quantité d'addition est utilisée, l'excédent ne doit être pris en compte ni pour le calcul du rapport eau/(ciment + $k \times$ addition), ni pour le dosage minimal en liant équivalent ;
- k est le coefficient de prise en compte de l'addition considérée (voir NA.5.2.5.2.2).

L'aptitude générale à l'emploi pour des bétons utilisés en France est établie pour les additions normalisées suivantes pour la substitution partielle du ciment et pour la détermination de la teneur minimale en liant équivalent :

- les cendres volantes pour béton conformes à la norme NF EN 450, puis à la norme NF EN 450-1 ;
- les fumées de silice, conformes à la norme NF P 18-502, puis à la norme NF EN 13263-1 ;
- les laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau de classe B, conformes à la norme NF P 18-506 ;
- les additions calcaires, conformes à la norme NF P 18-508 ;
- les additions siliceuses de catégorie A conformes à la norme NF P 18-509.

ABaque 2

NA.5.2.5.2.2 Concept du coefficient k pour les additions prises en compte

L'aptitude générale à l'emploi pour des bétons dont le lieu d'utilisation est la France, est établie pour les valeurs suivantes du coefficient k données dans le Tableau NA.3.

Tableau NA.3 — Valeurs du coefficient k

Dénomination de l'addition	Valeur du coefficient k	Conditions supplémentaires à remplir
Additions de type II		
Cendres volantes pour béton	0,60	Si $i_{28} \geq 0,83$ et $i_{90} \geq 0,95$
	0,50	Si $i_{28} \geq 0,80$ et $i_{90} \geq 0,90$
	0,40	Si $i_{28} \geq 0,75$ et $i_{90} \geq 0,85$
Fumées de silice	2,00	Si dans les expositions XA $E/C \leq 0,45$ et $C \geq 295 \text{ kg/m}^3$ Si dans les expositions différentes de XA $E/C \leq 0,45$ et $C \geq 280 \text{ kg/m}^3$
	1,00	Dans les autres cas ou sur prescription particulière
Laitiers vitrifiés moulés de haut-fourneau, de classe B	0,90	$i_{327} \geq 0,70$ $i_{328} \geq 0,85$

Tableau NA.3 — Valeurs du coefficient k (fin)

Dénomination de l'addition	Valeur du coefficient k	Conditions supplémentaires à remplir
Additions de type I		
Additions calcaires	0,25	$i_{90} \geq 0,71$
Additions siliceuses de classe A	0,25	$i_{28} \geq 0,71$
Toutes additions		
Pour les quantités d'additions dépassant les valeurs indiquées au Tableau NA.F.1 ou au Tableau NA.F.2 et pour les autres ciments ou les autres additions que celles mentionnées dans NA.5.2.5.2.1	0,00	

NOTE i_{28} , i_{90} , i_{328} et i_{327} sont des indices d'activité ou de pouvoir hydraulique déterminés selon les normes d'essais de l'addition considérée.

**ABAQUES ET TABLEUX
METHODE C.E.S DREUX-GORENNE**

E 111 GC

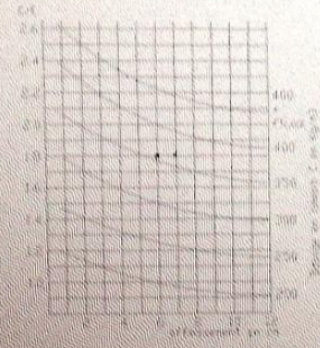
I- DOSAGE EN CIMENT ET EAU

$f_c = f_{cm} + B (H_{rel})$ $f_c = f_{cm} + G (C/E - 0,5)$

- Avec :
- f_c : résistance obtenue à 28 jours
 - f_{cm} : dosage du ciment en kg/m^3 de béton
 - B : dosage de l'eau en kg/m^3 de béton
 - G : Classe de ciment en MPa
 - C : coefficient granulométrique

Valuers approximatives du coefficient granulométrique G

Quantité des granulés	Dimension D des granulés		
	0-5	0-60	0-65
Sable fin	0,55	0,60	0,65
Sable	0,45	0,50	0,55
Poussière	0,35	0,40	0,45



Graphique indiquant approximativement le dosage en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité obtenue

Correction sur le dosage en eau

Déviations en %	20	12,5	7,5	5	2,5	1,25	0,625	0,3125
Correction en %	+2	+0	+4	+2	0	-2	-4	-6

II- DOSAGE EN POURCENTAGE DES GRANULATS

A- COURBE GRANULAIRE DE REFERENCE

Tableau G (norme 9.053.394)

Facteur de correction K_c (norme X₁ : 7,56)
Avec :

$K_c = 0,02$ si $d \leq 20$
 $K_c =$ moy de l'écarté (S, U) si $d > 20$
 $V_c = 95 - 1,1 \sqrt{150 - d} + K_c$

K_c : estimation de la compacité en fonction du type de granulat, de la forme des granulés, et du dosage en ciment.
Voir tableau ci-dessous

Type de granulat	Forme	Ciment		Béton	
		Compacité	Forme	Compacité	Forme
Sable fin	0-5	0	0	0	0
	6-60	+2	+2	+2	+2
Sable	0-5	+2	+2	+2	+2
	6-60	+2	+2	+2	+2
Poussière	0-5	+2	+2	+2	+2
	6-60	+2	+2	+2	+2

K_c : équivalent pour les sables de granulométrie au plus grossière : $FH = 2,8$
 $K_c = 2,8 / FH - 0,15$ (FH : module au triage du sable)

K_c : ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par les joints de béton.
 $K_c = 0$ si béton non pompable
 $5\% K_c$ si béton pompable

Estimation B (travaux D : 1600s)

B- LIGNE DE PARTAGE

La ligne de partage pour le point d'interface 95% de la courbe granulométrique du plus petit granulat au point d'interface 5% de la courbe granulométrique du plus gros granulat.

III- DOSAGE EN MASSE DES GRANULATS

Coefficient de taraboussi

Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des granulés						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Vibration faible	0,730	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration normale	0,735	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
Plastique	Vibration faible	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration normale	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850

Ces valeurs sont convertibles pour des granulats roulés si on il conviendra d'apporter les corrections suivantes :
 - sable malé et gravier concassé : -0,01
 - sable et gravier concassé : -0,03

