

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

Université Ahmed Draia Adrar
Faculté Des Sciences et de Technologies
Département Des Sciences et Technologie



Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme :

Master En Génie Civil
Option : Matériaux en génie civil
Présenté Par :

BERKANE Othmane

THEME

Les bétons autoplaçants : propriétés au jeune âge.

Soutenu Le 20/06/2018 Devant un membre de jury composé de :

Mme. AÏT HAMMOUDA KALLOUM Khedidja	Univ Adrar	Président
Mr. ABDELDJALIL M'hammed	Univ. Adrar	Examineur
Dr. SEMCHA abdelaziz	Univ Adrar	Encadreur

Année Universitaire 2017/2018

Remerciement

Avant toute chose, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir aidé et éclairé mon chemin.

Je tiens à remercier mes très chers parents qui ont le droit de recevoir mes chaleureux remerciements pour le courage et le sacrifice qu'ils ont consentis pendant la durée de mes études en leurs souhaitant une longue vie pleine de joie et de santé, je pense mon frère, mes sœurs et mes amis pour leur encouragement.

Je tiens à remercier les membres de jury d'avoir accepté d'examiner, d'évaluer et d'enrichir ce travail, toutes les personnes que j'ai pu côtoyer au cours de ma thèse et celles qui ont permis son bon déroulement et Les personnes qui m'ont aidé par leurs conseils et leurs encouragement à faire avancer mon projet et me rendre jusqu'à la fin.

Je voudrais souligner la contribution de mon directeur de mémoire **Dr. SEMCHA abdelaziz** par ses conseils et ses connaissances, il a su aiguiller le projet jusqu'à la fin.

Je voudrais aussi que mon Co-encadreur **Mr. BELHADJ AISSA djelloul** trouve mes meilleures salutations et reconnaissances pour son soutien, ses conseils et ses remarques importantes qui m'ont permis l'achèvement de cette mémoire.

Je remercie aussi tous mes professeurs pour leurs aides et leurs encouragements.

Résumé

Le travail de recherche présenté dans cette mémoire autour de le béton autoplaçants_ propriétés au jeune âge (à base des matériaux locaux).

Notre travail aura donc pour trouver la bonne combinaison des matériaux locaux compatibles et le dosage convenable de chacun de ces constituants pour obtenir une formulation des BAP spécifique à cette région.

Nous avons testées 4 bétons dont 3 BAP avec différents pourcentage d'addition en fillers calcaires (30%, 40% et 50%) et un BAP témoin (avec 0% d'addition en fillers calcaires).

Les résultats expérimentaux montrent que les résistances mécaniques à la compression augmentent avec le temps par l'ajoute d'addition en fillers calcaires, Ensuite que le surdosage de super-plastifiant et le surdosage d'addition en fillers calcaires elles sont influées directement sur la rhéologie de notre BAP.

Mots clés : Béton auto-plaçant, Propriétés mécaniques, optimisation, état frais, rhéologie

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Etude bibliographique.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.1.2 Définition	3
I.1.3 Domaines d'application	3
I.2 Particularités de la composition du BAP.....	4
I.2.1 Un volume de pâte élevé	4
I.2.2 Une quantité de fines (< 80 µm) importante	5
I.2.3 L'emploi de super-plastifiant	5
I.2.4 L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau)	6
I.2.5 Un faible volume de gravillon	7
I.3 Formulation des bétons autoplaçants.....	9
I.3.1 Formuler un béton	9
I.3.2 Pratique actuelle de la formulation des BAP	10
I.3.3 Approches de formulation	11
I.3.4 Différentes types des méthodes	12
a). Méthode Japonaise	12
b). Méthode Suédoise	13
c). Méthode Française	14
d). Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire	15
I.5 Caractérisation des BAP à l'état frais	16
I.5.1 Essai d'étalement	16
I.5.2 L'essai de la boîte en L	17
I.5.3 Essai de stabilité au tamis	17
I.5.4 Essai de ressuage	18
I.5.5 Essai J-Ring	19
I.5.6 Essai V funnel	20
I.5.7 Essai du Caisson (capacité de remplissage)	21
I.6 Conclusion	22

Chapitre II

II.1 Introduction	23
II.2 Caractérisation des matériaux locaux de bases	24
II.2.1 Sable	24
II.2.1.a. Granulométrie [NF P 18-560]	24
II.2.1.b. Module de finesse (%)	26
II.2.1.c. L'équivalent de sable [NF P 18-598]	27
II.3. Les masses volumiques	30
II.3.1. La masse volumique absolue [NA.255/1990]	30
II.3.2. La masse volumique apparente [NA.255-5/1990]	31
II.4. Graviers : (3/8, 8/15)	32
II.4.1. Analyse granulométrique [NF P 18-560]	33
II.4.2. La masse volumique des granulats	34
II.4.3. Propriété superficielle	35
II.5. Matériaux	35
II.5.1. Ciment	35
II.5.2. Les additions minérales	36
II.5.3. Eau de gâchage	37
II.5.4. Adjuvant	37
II.5.5. Les granulats	37
II.5.6. Le sable	38
II.5.7. Les graviers	38
II.6. Caractéristiques physiques	39
I.7. Conclusion	40

Chapitre III

III.1 Introduction	41
III.2 Formulation et mise en œuvre du béton.....	42
III.2.1 Optimisation du squelette granulaire par la méthode "DREUX-GORISSE"	42
III.2.2 Optimisation de la granulométrie des gravillons	48
III.3 Malaxage des bétons	50
III.4 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais	51

III.4.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams [NFEN12 350-8]	51
III.4.2 Essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11]	53
III.4.3 Essai de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10]	56
III.5 La masse volumique du béton autoplaçant [NF EN 12 350-6]	57
III.6. Conclusion	57

Chapitre IV

IV.1 Introduction	58
IV.2 Présentation des résultats	58
IV.3 Caractérisation des BAP à l'état frais	58
IV.4 Règles complémentaires dans la norme NF EN 206/CN (ANNEXE L)	59
IV.4.1 Spécifications des classes d'étalement (cône d'Abrams).....	59
IV.4.2 Spécifications liées à l'écoulement (boite en L)	59
IV.4.3 Spécifications sur l'essai de ségrégation au tamis	60
IV.5 : Les résultats	61
IV.5.1 L'étalement	61
IV.5.2 Le taux de remplissage	61
IV.5.3 L'indice de ségrégation	62
IV.6 Analyse les résultats	62
Conclusion générale.....	65
Conclusion générale.....	65
Référence bibliographique.....	66
ANNEXE.....	69

LISTE DES FIGURES

Figure I.01: Action des super-plastifiant - Déflocculation des grains de ciment	6
Figure I.02 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides	6
Figure I.03 : Optimisation du dosage agent de viscosité – super-plastifiant	7
Figure I.04: Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle	8
Figure I.05: Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton ordinaire	9
Figure I.06: Notion d'excès de pâte	15
Figure I.07: Essai d'étalement au cône (slump flow)	16
Figure I.08: Essai de la boîte en L	17
FigureI.09: Tamis de 5mm+fond-mesure de la laitance	18
Figure I.10: Essai de ressuage	19
Figure I.11: Essai J. Ring	19
FigureI.12: L'essai V-funnel	20
Figure I.13: Essai de capacité de remplissage	21
Figure II.01: Sable des dunes de Bouda utilisé.....	24
Figure II.02: Essais d'équivalent de sable.....	27
Figure II.03: équipements nécessaires pour l'équivalent de sable.....	28
Figure II.04: Les granulats 3/8 et 8/15 utilisés.....	32
Figure II.05: Fillers calcaires HAROUCI.....	35
Figure II.06: Plan de situation de concasseur Harouchi.....	37
Figure II.07: Sable des dunes de Bouda.....	38
Figure II.08: Concasseur Harouchi.....	38
Figure III.01: Courbe d'analyse granulométrique.....	45
Figure III.02: Courbe de mélange.....	48
Figure III.03: malaxeur utilisé.....	50
Figure III.04: Essai au cône d'Abrams.....	51
Figure III.05: Essai d'étalement.....	53
Figure III.06: Essai au tamis.....	53
Figure III.07: Stabilité au tamis.....	54
FigureIII.08: Essai de boit L.....	56
FigureIV.01: l'étalement en fonction de pourcentage FC.....	61

FigureIV.02: Le taux de remplissage en fonction de pourcentage FC.....	61
FigureIV.03: L'indice de ségrégation en fonction de pourcentage FC.....	62
FigureIV.04: La résistance à la compression à 2 jours en fonction de pourcentage FC.....	63
FigureIV.05: La résistance à la compression à 7 jours en fonction de pourcentage FC.....	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.01: Analyse granulométrique de sable.....	26
Tableau II.02: Refus cumulé pour le module de finesse.....	26
Tableau II.03: Résultats de propreté du sable par l'essai ES.....	29
Tableau II.04: Résultats les masses volumiques de sable.....	32
Tableau II.05: Analyse granulométrique graviers3/8.....	33
Tableau II.06: Analyse granulométrique graviers 8/15.....	34
Tableau II.07: Résultats les masses volumiques des granulats.....	34
Tableau II.08: Résultats de propriété superficielle des granulats.....	35
Tableau II.09: Caractéristique physique et chimique du ciment (à compléter).....	35
Tableau II.10: Caractéristique physique et chimique du Fillers concasseur Harouchi.....	36
Tableau II.11: Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers.....	39
Tableau II.12: Caractéristiques physiques et mécaniques de Sable de dune et Fillers.....	40
TableauIII.01: les valeurs de terme correcteur K.....	43
Tableau III.02: valeurs du coefficient granulaire G.....	46
Tableau III.03: correction en pourcentage sur le dosage en eau.....	46
Tableau III.04: Le volume initial et le volume corrigé.....	47
Tableau III.05: la composition pondérale du béton par 1m ³ après la correction.....	47
Tableau III.06: les différentes constituions pour les formulations des bétons.....	49
Tableau IV.01 : Les résultats des essais de caractérisation à l'état frais.....	58
Tableau IV.02: Spécifications les classes d'étalement.....	59
Tableau IV.03: Spécifications liées à l'écoulement.....	59
Tableau IV.04: Spécifications sur l'essai de ségrégation au tamis.....	60

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les constructions à travers le monde. En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible cout et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, comme des immeubles de bureaux ou d'habitation, des ponts, des centrales nucléaires.

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était destiné. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BFM) et les bétons de poudre réactive (BPR). Après la recherche du gain maximum de résistance et de durabilité, une étape supplémentaire a été franchie avec les bétons autoplaçants (BAP). Plus qu'une nouvelle famille de béton, les BAP constituent davantage une nouvelle technologie de construction. Celle-ci visait en effet au départ (fin des années 1980, au Japon) à optimiser la productivité des constructions en béton. Les différents avantages technico-économiques qu'elle présente ont suscité un intérêt grandissant des industriels à travers le monde, aussi bien dans les secteurs de la préfabrication que dans ceux des centrales de béton prêt à l'emploi. Les principaux avantages des BAP sont liés à leur mise en place qui ne nécessite l'apport d'aucune vibration, qu'elle soit interne ou externe. Ces avantages sont d'ordre technico-économique mais également social. Ainsi, l'absence de vibration des BAP engendre une diminution sensible des nuisances sonores ainsi que de la pénibilité du travail et une réduction des délais et des coûts globaux de production. Sa fluidité permet également de couler des milieux fortement ferraillés ou à géométrie complexe. Cette mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité du matériau mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de super-plastifiants et de fines ou l'emploi d'un agent de viscosité.

En Algérie, et spécialement dans notre région aride d'Adrar, ce type de béton présente un intérêt certain puisque les impératifs d'une meilleure qualité des ouvrages et aussi la complexité des coffrages commencent à se sentir de plus en plus ces dernières années.

En vue la disponibilité des matériaux locaux dans cette région qui dispose d'une diversité de gisements prêt à l'exploitation d'où une valeur ajoutée dans un contexte technologique qu'économique et afin de répondre aux besoins des maitres d'ouvrages en matière de formulation des BAP; notre travail aura donc pour mission de trouver la bonne combinaison de matériaux locaux compatibles, et le dosage convenables de chacun de ces constituants pour obtenir une formulation des BAP spécifique à cette région tous en intégrant le gradient thermique pour des confection des BAP pendant les différentes saisons (chaudes et hivernales).

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1 Introduction :

Ce chapitre présente une recherche bibliographique qu'on a effectuée avant d'entamer notre étude expérimentale. Nous allons commencer par des généralités sur les bétons autoplaçants (BAP) et les domaines d'application, ensuite nous avons étudié les particularités de la composition des BAP et la formulation de ce type de béton aussi les caractérisations des bétons à l'état frais, enfin les propriétés du béton.

I.1.2 Définition :

Les BAP constituent une nouvelle génération de béton, ce sont des bétons très fluides, se mettant en place sans vibration. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de superplastifiant et l'ajout d'une farine micronisée qui avec l'eau et le ciment constitue une suspension colloïdale de viscosité nécessaire, dans laquelle « nagent » les granulats plus grossiers sans aucune tendance à la ségrégation. Différentes formulations sont étudiées permettant d'évaluer l'influence des différents ajouts tels que laitier granulé, filler calcaire et poudre de verre sur les propriétés des BAP [3].

I.1.3 Domaines d'application :

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.) [4].

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant :

- des densités de ferrailage importantes.
- des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc.
- des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc.
- des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- des exigences architecturales et de qualité des parements particulières.
- des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration.

Le BAP est une solution bien adaptée pour [5] :

- Tous types de dalles y compris dalles de compression sur poutrelles hourdis.
- Radiers.
- Plancher dalle pleine et plancher chauffant.
- Rattrapage de niveau en rénovation.
- Fondations superficielles.
- Voiles, poteaux, poutres.

Ce type de béton est particulièrement bien indiqué pour le remplissage d'éléments à forte densité d'armatures. Il répond également bien aux exigences posées par la réalisation d'éléments en béton à géométrie complexe, en génie civil comme en bâtiment.

I.2 Particularités de la composition du BAP :

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre [6].

I.2.1 Un volume de pâte élevé :

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400l/m³) [6].

I.2.2 Une quantité de fines (< 80 µm) importante :

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (de 100 à 200 kg/m³ selon la recommandation de l'A.F.G.C) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé) [7].

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, normes XP P 18-305 ou EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc., le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective.

I.2.3 L'emploi de super-plastifiant :

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des super-plastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type poly carboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage [8].

Les super-plastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante.

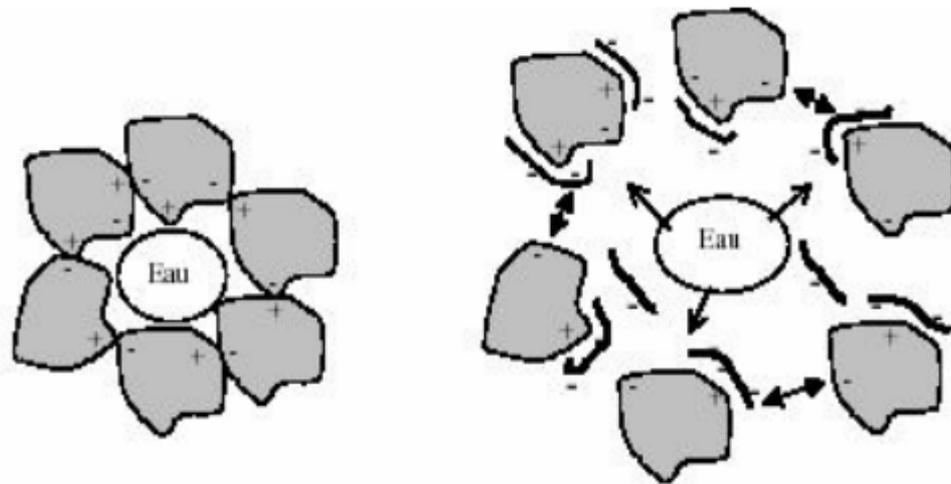


Figure I.01 : Action des super-plastifiant - Défloculation des grains de ciment [8].

I.2.4 L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau) :

L'ajout d'un super-plastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (figure I.02). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants [6].

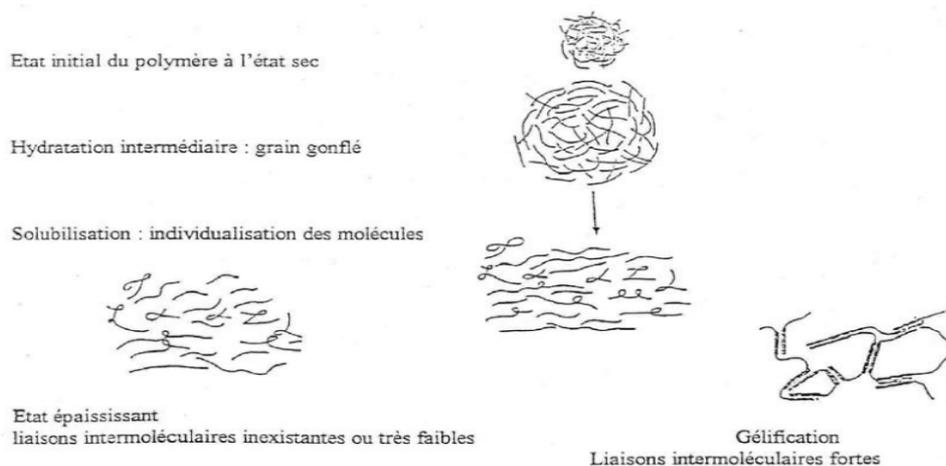


Figure I.02 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides [6].

Cependant l'action de ces produits est d'une certaine façon opposée à celle du super-plastifiant. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité – super-plastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage.

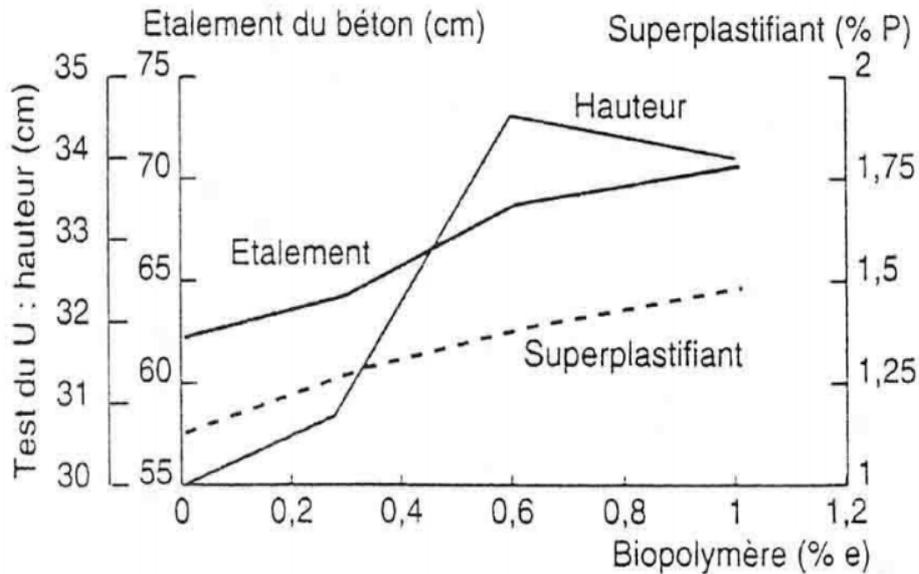


Figure I.03 : Optimisation du dosage agent de viscosité – super-plastifiant [10].

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines < 0,3). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [8].

I.2.5 Un faible volume de gravillon :

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée (figure I.04). Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

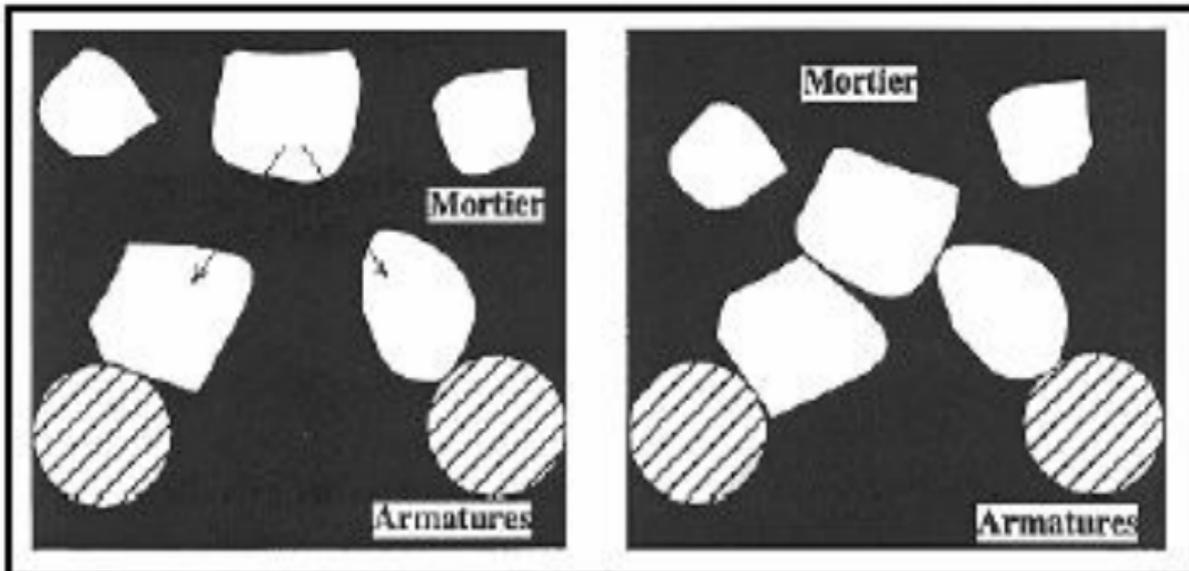


Figure I.04 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [8].

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1 qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons (DMAX) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec DMAX, cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

En résumé les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes (figure I.05). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les super-plastifiant) sont nécessaires [8].

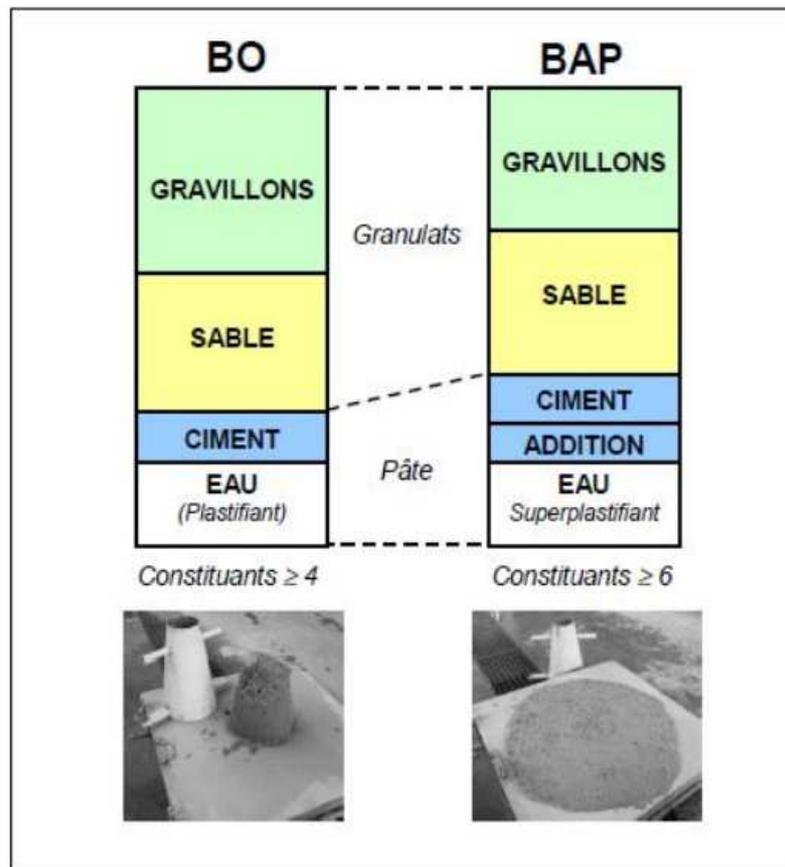


Figure I.05 : Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton ordinaire [8].

I.3 Formulation des bétons autoplaçants :

I.3.1 Formuler un béton :

Formuler un béton c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams. Pour des chantiers plus spécifiques d'autres propriétés peuvent être demandées comme par exemple une prise retardée une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient [9].

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'abaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables / gravillons sur une courbe de référence.

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut réaliser, en plus de l'essai au cône, l'essai à la boîte en L et l'essai de stabilité au tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation.

I.3.2 Pratique actuelle de la formulation des BAP :

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants (l'industrie du bâtiment) qui utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer).

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en super-plastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût.

Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail de la formulation.

- ✚ Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- ✚ Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- ✚ La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme P18-305, soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- ✚ Le dosage en super-plastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle. Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication par exemple la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP [9].

I.3.3 Approches de formulation :

Les premiers travaux réalisés par le professeur OKAMURA mettent en avant une série de critères facilitant l'obtention des propriétés autoplaçants.

Pour appréhender de manière la plus complète possible l'ensemble des paramètres de formulations, les recherches entreprises recensées dans la littérature se basent essentiellement sur des approches diphasiques du matériau. Elles se focalisent sur l'optimisation soit de la fraction fine la pâte de ciment ou le mortier, soit du squelette granulaire.

D'autres études vont plus loin en cherchant à associer deux phases optimisées.

L'optimisation de la phase fine est généralement basée sur des critères d'écoulement (essais rhéologiques ou d'ouvrabilité) permettant une optimisation des dosages des constituants respectifs (essentiellement de l'eau et des adjuvants chimiques). L'optimisation du squelette granulaire est réalisée de manière à atteindre le meilleur arrangement conduisant ainsi à la compacité maximale. Les deux phases sont ensuite associées de manière à produire un béton autoplaçant. Cette association peut être basée sur plusieurs critères [10] :

- des considérations sur la capacité de passage entre les armatures de la structure considérée qui fixent le volume critique de granulats associé ensuite avec un volume de pâte minimal pour permettre l'écoulement.
- un volume de pâte minimal nécessaire pour remplir les vides entre les gravillons couplé avec une épaisseur minimale de pâte entourant ces mêmes gravillons pour permettre l'écoulement du béton.

Si ces méthodes sont utilisées avec succès dans le cadre dans lequel elles ont été définies elles ne permettent pas toujours de prendre en considération la grande variabilité des constituants disponibles sur le marché.

Il est alors nécessaire d'adapter chacune d'entre elles au cas par cas pour la rendre compatible avec les contraintes locales (nature et propriété des matériaux, réglementation en vigueur) [10].

I.3.4 Différentes types des méthodes :

a) Méthode Japonaise [17] :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre.

Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

1. Dosage des gravillons :

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

2. Dosage du sable :

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

3. Dosage du liant :

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³).

Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

4. Dosage de l'eau et du super plastifiant :

Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

b). Méthode Suédoise : proposée par [Petersson et al, 1996] :

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al, 1995]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le super-plastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée.

Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat [17].

c). Méthode Française :

Méthode française (LCPC) : proposée par [De Larrard et al, 1994] :

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- ✚ Les distributions granulaires.
- ✚ les proportions du mélange.
- ✚ la compacité propre.
- ✚ la densité apparente.

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple).
- le dosage, à saturation, du super-plastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- le besoin en eau de ce mélange (en présence du super-plastifiant) est déterminé.
- les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104 La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en super-plastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes [17].

d). Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire [16] :

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

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, comme mentionnée sur la Figure I.06, la formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

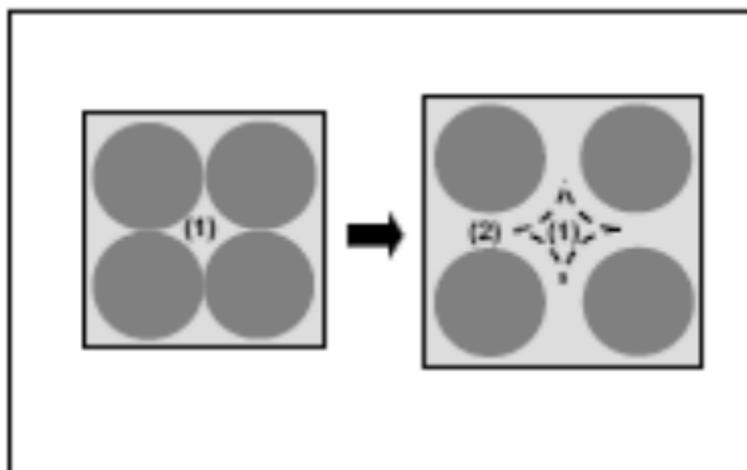


Figure I.06 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).

I.5 Caractérisation des BAP à l'état frais :

Contrairement au béton ordinaire, le béton autoplaçant présente une difficulté particulière pour sa formulation et sa caractérisation. En effet, il doit concilier deux propriétés, a priori contradictoires, à savoir la fluidité et l'absence de ségrégation et de ressuage. Il doit satisfaire à plusieurs tests pour pouvoir être qualifié d'autoplaçant.

Avant d'accepter une composition comme celle d'un BAP, il faut s'assurer que le béton résultant possède effectivement les qualités que l'on espère. Pour cela, il existe de nombreux essais permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton à l'état frais [3].

I.5.1 Essai d'étalement :

C'est l'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant de caractériser la mobilité en milieu non confiné. L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton. C'est une variante de l'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtés perpendiculaires. Les valeurs sont relevées en millimètres (Figure I.07) [1].

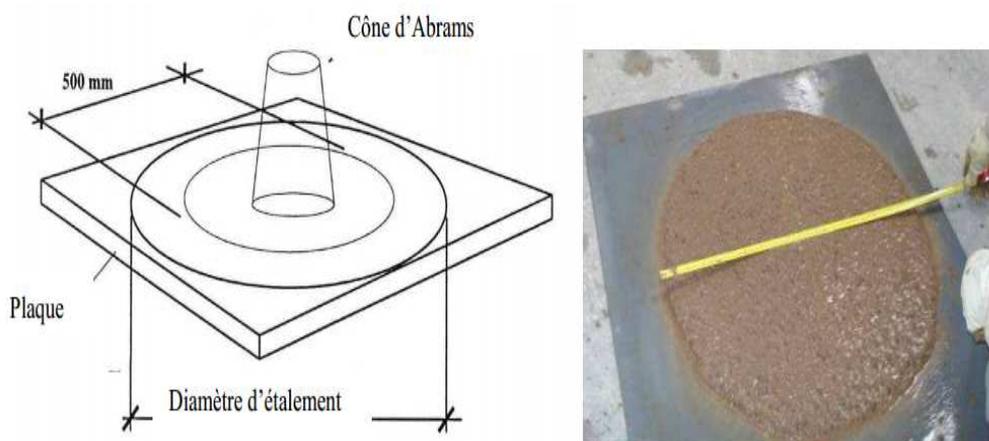


Figure I.07 : Essai d'étalement au cône (slump flow) [1].

Les valeurs d'étalement sont habituellement fixées entre 60 et 75 cm, sans auréole de laitance ou d'amoncellement de gros granulats au centre en fin d'essai [AFGC, 2000].

La vitesse d'étalement du béton est également une indication souvent prise en compte (t_{50} par exemple : temps pour atteindre une galette de diamètre 50 cm) [1].

I.5.2 L'essai de la boîte en L :

L'essai de la boîte en L (fig.I.08) fait partie de ces essais. La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante : la partie verticale de la boîte est remplie de béton, on lève la trappe, ce qui provoque l'écoulement du béton dans la partie horizontale à travers d'un grillage formé de trois barres d'armatures $\Phi 16\text{mm}$ distante de 50mm. Enfin quand le béton s'arrête de s'écouler, on mesure les hauteurs h_1 et h_2 , on vise un rapport h_2/h_1 d'au moins 0.8 [11].

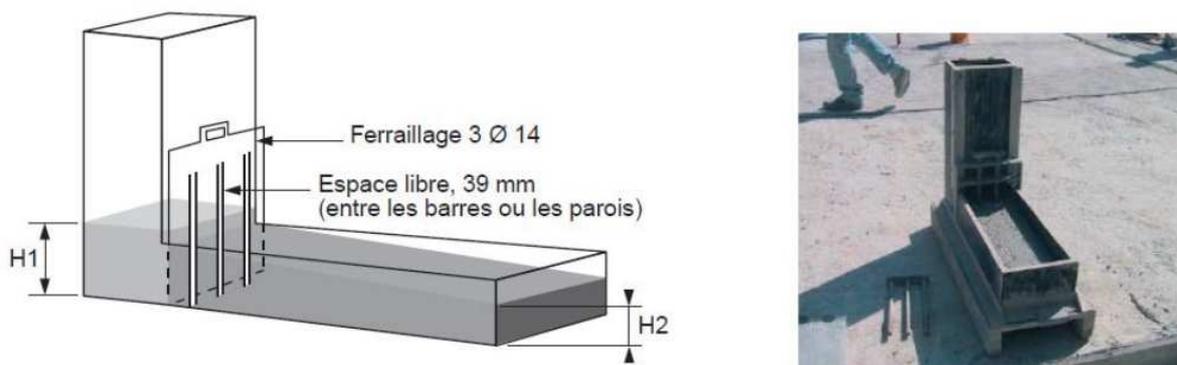


Figure I.08 : Essai de la boîte en L [11].

I.5.3 Essai de stabilité au tamis :

Cet essai vise à qualifier les bétons auto plaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il complète les essais permettant d'apprécier la mobilité en milieu confiné (boîte en L) ou non (étalement), en caractérisant la stabilité. [11].

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. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes [12] :

- $0\% \leq \% \text{ P laitance} \leq 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < \% \text{ P laitance} \leq 30\%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ,
- $\% \text{ P laitance} > 30\%$: stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.



Figure I.09 : Tamis de 5mm+fond-mesure de la laitance [13].

I.5.4 Essai de ressuage :

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables [14].

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée. Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée [14].

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié développé au LCPC (Figure I.10). Le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloréthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [15]. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit.

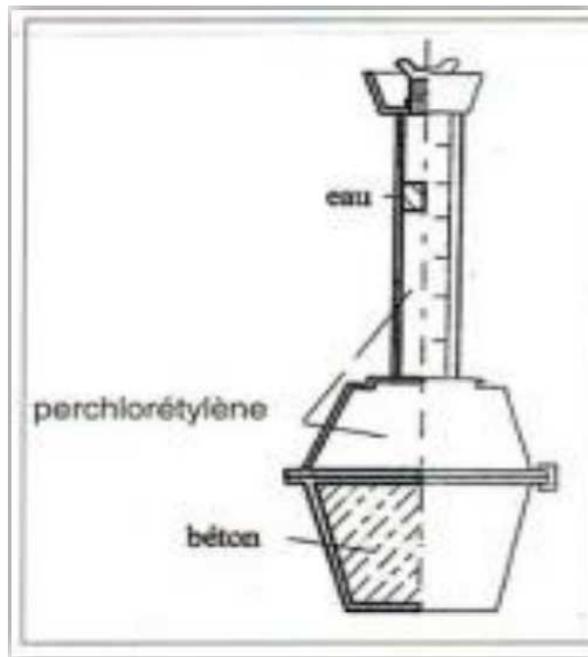


Figure I.10 : Essai de ressuage [15].

I.5.5 Essai J-Ring :

Cet essai consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. Le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. On caractérise donc la tendance à la ségrégation et l'enrobage d'armatures. De plus, la répartition des granulats doit être homogène [1].



Figure I.11 : Essai J. Ring [13].

I.5.6 Essai V funnel :

Un autre essai permet d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné comme celui de l'entonnoir en forme de V (V funnel) (Figure) [1].

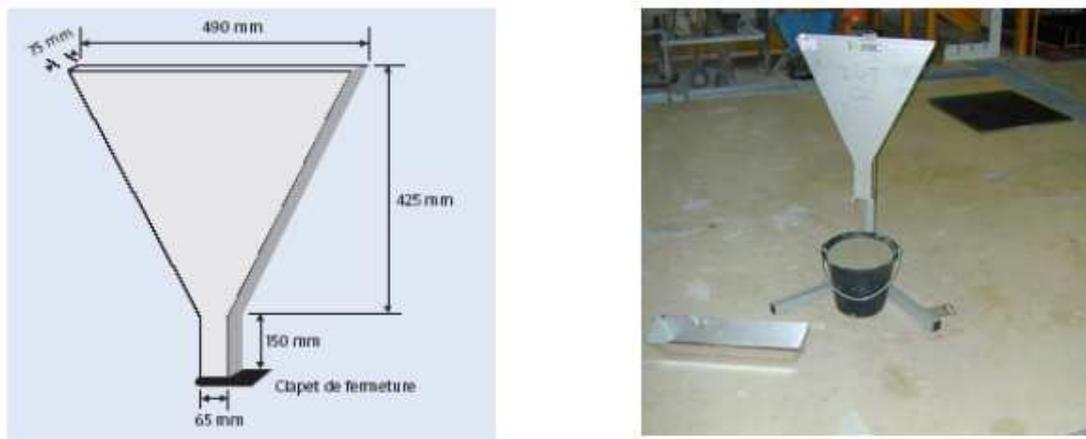


Figure I.12 : L'essai V-funnel [13].

L'essai d'étalement est généralement relié au seuil d'écoulement du matériau et l'essai V funnel est relié à la viscosité, bien que le seuil d'écoulement soit également mobilisé aux parois du dispositif. Le résultat d'un essai empirique seul n'est, cependant, pas suffisant pour décrire convenablement le comportement du béton [1].

Les temps d'écoulement au V-funnel dépendent également du type d'application, mais ne sont regroupés que selon 2 classes [EFNARC, 2002]

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

I.5.7 Essai du Caisson (capacité de remplissage) :

L'appareillage illustré à la Figure I.13 consiste en une boîte rectangulaire aux parois lisses, dans laquelle sont montés transversalement à partir de 150 mm d'une des extrémités, 35 tubes de cuivre de 16 mm de diamètre disposés en cinq rangées et distants de 34 mm. Les panneaux latéraux longitudinaux de la boîte sont en matériau transparent (acrylique) d'une épaisseur de 12,5 mm [1].

L'aptitude au remplissage est définie par le rapport exprimé en pourcentage de la surface recouverte de béton, à la surface latérale (350 x 220 mm), qui doit être supérieur à 60% [1].

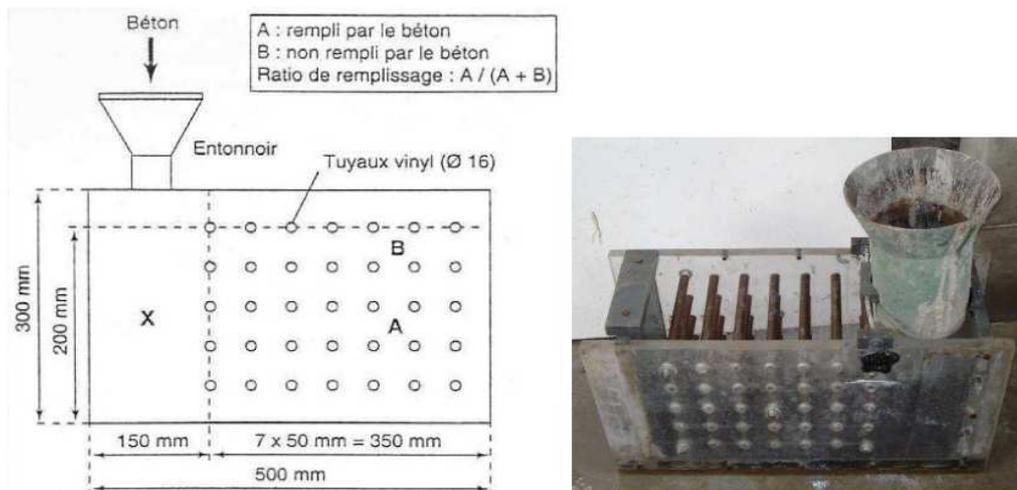


Figure I.13 : Essai de capacité de remplissage [1].

I.6 Conclusion :

A partir de la recherche bibliographique, nous avons obtenue qu'il y a plusieurs domaine d'application de béton autoplaçant.

Les bétons autoplaçants se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- ❖ une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement).
- ❖ une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage).

A cet effet l' [AFGC], a émis des recommandations qui se limitent en trois essais : mesure d'étalement ; essai de la boîte en « L » ; et l'essai de stabilité au tamis.

Chapitre II
Matériaux & programme
expérimental

II.1 Introduction :

La recherche bibliographique nous a permis de présenter le BAP.

Avant de passer à l'étude de propriétés de notre BAP, il faut passer d'abord par la caractérisation de tous leurs composants, ensuite à l'étude de leurs formulations pour aboutir à leur caractérisation au jeune âge.

Ce chapitre a donc pour objectif de présenter de manière synthétique l'ensemble du contexte expérimental qui a servi de support de ce mémoire. On a débuté par la mise en œuvre des essais de caractérisation des matériaux utilisables (analyse granulométrique, masse volumique ...) en conduisant à la réalisation d'une formulation du béton ordinaire par la méthode de Dreux-Gorisse et béton autoplaçant empiriquement (La formulation du BAP est une opération complexe, donc la plupart des formulations du BAP qui sont développées à travers le monde de façon empirique).

Ensuite faire des essais indiquant l'état frais du BAP selon les recommandations de l'A.F.G.C.

Enfin, on a décrit la préparation des éprouvettes et le matériel pour la réalisation des essais mécaniques instantanés.

II.2 Caractérisation des matériaux locaux de bases :

II.2.1 Sable de BOUDA :

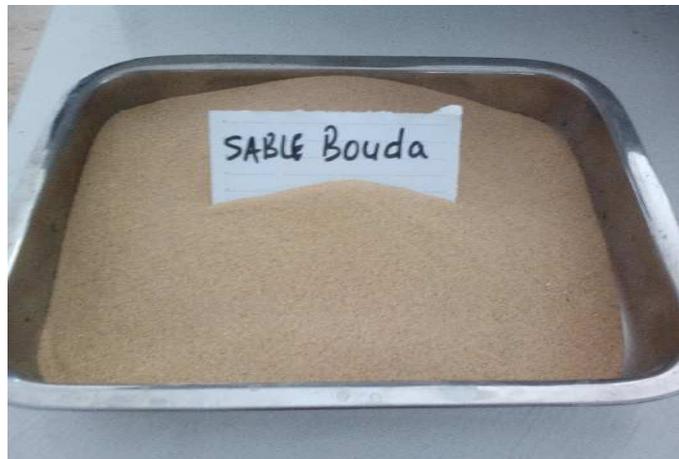


Figure II.01 : Sable des dunes de Bouda utilisé.

II.2.1.a. Granulométrie [NF P 18-560]:

Equipement nécessaire :

- Série de tamis normalisés ;
- Balance ;
- Table vibrante ;
- Tare.

Mode opératoire :

- Prélever l'échantillon qui va soumettre à l'essai.
- Prélever une masse de 1200g de matériau (sable sec).
- Peser chaque tamis à vide, soit m_i la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propre et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimer en mm) [5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125-0,08-fond].
- Verser le sable sur la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique pendant 5minutes.
- Peser chacun des tamis.
- On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1% entre deux séquences de vibration de la tamiseuse.
- A la fin de tamisage peser les refus en matière retenue par chaque tamis à 1g près, soit M_i : la masse de tamis (i) +le sable.
- Calculer la différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles correspond au refus partiel R_1 de tamis 1).
- Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur.
- Ajouter le refus obtenu sur le second tamis à R_1 , soit R_2 la masse de refus m de tamis 2 ($R_2=R_1 +$ refus partiel sur tamis 2).
- Pour suivre la même opération avec la rente des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumules $R_3 R_4 \dots R_n$ le tamisât est calculé par la relation : $T=100 - R_c$ (R : refus cumulé en % T : tamisât en%).

Les résultats d'analyse granulométrique du sable sont représentés dans le tableau suivant :

Résultat d'analyse granulométrique du sable bouda :

Tableau II.01 : Analyse granulométrique de sable.

Tamis	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage refus	Pourcentage passant
5	00	00	00	100
2.5	00	00	00	100
1.25	0.1	0.1	00	100
0.63	101.4	101.5	8.5	91.5
0.315	1018.4	1120.2	93.4	6.7
0.160	44.7	1164.9	97.1	2.9
0.08	25.3	1190.2	99.2	0.8

II.2.1.b. 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 de mailles : [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 et 5mm] sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$Mf = \frac{\sum \%Rc(0,16 + 0,315 + 0,63 + 1,25 + 2,5 + 5)}{100}$$

:

Tableau II.02 : Refus cumulé pour le module de finesse

Tamis	Refus cumulé [%]
0.160	97.1
0.315	93.4
0.63	8.5
1.25	00
2.5	00
5	00

D'où : MF = 1.99

Les normes soviétiques spécifient de Mf des sables comme suit :

- Sables gros $Mf > 2.5$
- Sables moyen $2 < Mf < 2.5$
- Sables fin $1.5 < Mf < 2$
- Sables très fin $1 < Mf < 1.5$

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant :

$$Mf = 1.99 > 1.5$$

Nous avons le module de finesse entre 1.5 et 1 donc on peut dire que notre sable est un sable fin.

II.2.1.c. L'équivalent de sable [NF P 18-598] :

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

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

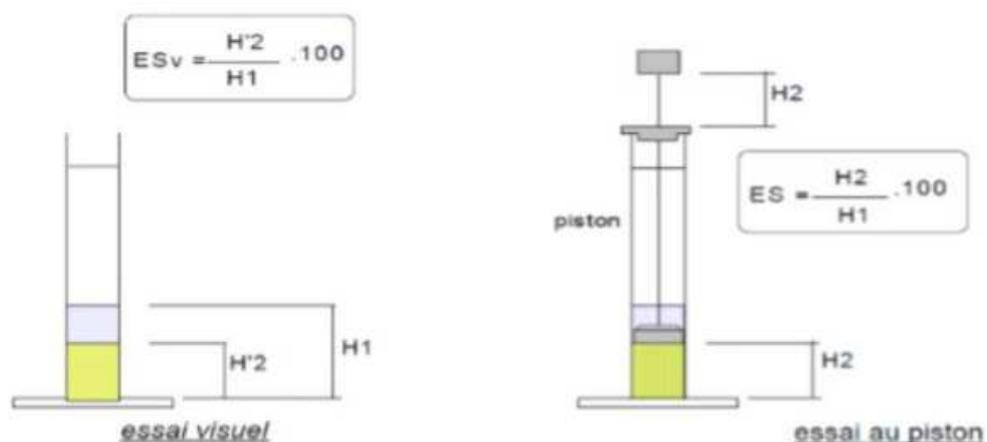


Figure II.02 : Essais d'équivalent de sable

Equipements nécessaires :



Figure II.03 : équipements nécessaires pour l'équivalent de sable.

- Eprovettes en deux traits repères, et leurs bouchons.
- Entonnoir.
- Bonbonne de **5l** contenant la solution lavant, avec son bouchon, un siphon et un tube souple de **1,5 m**.
- Tube laveur métallique plongeant.
- Machine agitatrice.
- Règle métallique.
- Piston taré à masse glissante de **1 Kg**.
- Balance de précision **0,1**

Mode opératoire :

L'essai est réalisé sur **2** échantillons et on prend la moyenne.

- Verser la solution lavant dans l'éprouvette jusqu'à le premier trait.
- Peser une masse de **120** g de l'échantillon.
- Transvaser la prise d'essai dans l'éprouvette.
- Chasser les bulles d'air en frappant la pomme de la main sur la base de l'éprouvette.
- Laisser reposer pendant **10** minutes.
- Fermer l'éprouvette et l'agiter au moyen d'une machine agitatrice à **90** cycles en **30** secondes.
- Rincer les parois de l'éprouvette, puis enfoncer le tube laveur jusqu'à le fond de l'éprouvette.

En réalisant un mouvement doux de piquage et en faisant tourner la tube entre les doigts afin d'assurer la remontée des fines.

- Remplir l'éprouvette jusqu'au deuxième trait.
- Laisser reposer le tout pendant **20** minutes.
- Posséder au mesure par rapport à la base le niveau de floculat (**h1**) et à l'aide d'un piston descendu jusqu'à ce qu'il pose sur la partie du sédiment sableux.

On déduit l'équivalent du sable qui par convention égale à : **ES=100h1/h2**

Tableau II.03 : Résultats de propreté du sable par l'essai ES

	Essai 1	Essai 2
Hauteur totale H1 (cm)	9.8	9.7
Hauteur de sable H2 (cm)	9.3	9.2
ES= H2/H1*100	94.89	94.84
ES moyen (%)	94.86	

II.3. Les masses volumiques :

But de l'essai :

Cet essai a pour but de déterminer la masse contenant dans un volume donné d'une fraction granulaire, permettant d'obtenir ainsi une composition optimale du béton.

Principe de l'essai :

Il permet de définir, dans un volume donné, le poids de tout échantillon. C'est une mesure indirecte appliquée dans les chantiers comme argument de contrôle de dosage des constituants.

II.3.1. La masse volumique absolue [NA.255/1990] :

Elle est indiquée, par unité de volume, la masse absolue de chaque matériau sans tenir compte les vides existants qu'ils soient dans ou entre les grains.

Equipements nécessaires :

- Eprouvette graduée
- Balance de précision **0,1g**
- Tare.

Mode opératoire :

- ❖ Peser une masse (M) bien déterminée de sable.
- ❖ Remplir l'éprouvette par un volume d'eau (V1).
- ❖ Verser la prise d'essai de sable dans l'éprouvette.
- ❖ Définir le nouveau volume (V2).

La masse volumique est donc : $M_v, \text{abs} = M / (V2 - V1)$

II.3.2. La masse volumique apparente [NA.255-5/1990] :

Qu'on indique aussi dans l'appellation « masse volumique en vrac », qui est une masse de constituants secs par unité de volume où les vides entre les grains sont inclus.

L'équipement nécessaire :

- ❖ Balance.
- ❖ Récipient.
- ❖ Tare.
- ❖ Règle.

Mode opératoire :

- Déterminer le volume du récipient (**V**).
- Poser le récipient sur la balance et tarer sa masse
- mettre l'échantillon de la paille dans le récipient
- Laisser couler l'échantillon au centre de la masse jusqu'à qu'il débord
- Araser à la règle.
- Peser le contenu du récipient (**M**).

Alors la masse volumique apparente est : $M_v, app = M/V$

Les résultats de la masse volumique absolue et apparente dans le tableau suivant :

Tableau II.04 : Résultats les masses volumiques de sable.

La masse volumique absolue (g/cm ³)	La masse volumique apparente (g/cm ³)
2.60	1.56

II.4. Grapiers : HAROUHI (3/8, 8/15) :

Deux classes granulaires ont été utilisées pour la confection de notre BAP : classe 3/8 et 8/15. La figure II.04 montre une photographie de ces deux graviers :



Figure II.04 : Les granulats 3/8 et 8/15 utilisés.

II.4.1. Analyse granulométrique [NF P 18-560] :

La granulométrie est l'un des paramètres les plus importants à considérer dans l'établissement d'une formulation de béton. Sa connaissance permet d'établir avec précision le dosage en granulats de manière à optimiser le squelette granulaire et ainsi réduire sa compacité selon les méthodes usuelles de formulation. L'analyse granulométrique permet également d'évaluer la teneur en éléments fins à travers la valeur du module de finesse. La continuité et la régularité de la granularité.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon. L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant des tamis. Emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

Les résultats de ces analyses granulométriques pour les graviers 3/8 et 8/15 sont résumés dans les Tableaux II.05 et II.06 :

Tableau II.05 : Analyse granulométrique graviers3/8.

Tamis	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage refus	Pourcentage passant
8	00	00	00	00
6.3	182.2	182.2	10.72	89.28
5	599.9	782.1	46.01	53.99
2.5	829.9	1612	94.82	5.18
1.25	81.6	1693.6	99.62	0.38

Tableau II.06 : Analyse granulométrique graviers 8/15.

Tamis	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage refus	Pourcentage passant
16	182.5	182.5	5.21	94.97
12.5	912.3	1094.8	31.28	68.72
10	1000.9	2095.7	59.87	40.13
8	741.2	2836.9	81.04	18.96
6.3	465.6	3302.5	94.34	5.66
5	132.7	3435.2	98.13	1.87
2.5	57.5	3492.7	99.78	0.22

II.4.2. La masse volumique des granulats :

Le tableau II.07 présente les deux différentes masses volumiques de granulat :

Tableau II.07 : Résultats des masses volumiques des granulats.

	Masse volumique Absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)
gravier 3/8	2.71	1.28
gravier 8/15	2.69	1.42

II.4.3. Propriété superficielle :

Tableau II.08 : Résultats de propriété superficielle des granulats.

	Class 3/8	Class 8/15
Poids humide échantillon P1 (g)	747	664.7
Poids sec échantillon P2 (g)	651.4	660.1
Propreté P(%)= [(P1-P2)/P2*100]	14.68	0.70

- Pour le gravier 8/15 nous avons 0.70% inférieur à 5%, donc on peut dire que ce gravier il est propres.
- Pour le gravier 3/8 nous avons 14.68% supérieur à 5%, donc on peut dire que ce gravier il est impurété.

II.5. Matériaux :

II.5.1. Ciment :

Dans cette étude, un CPJ - CEM I 52,5R (STG) sera utilisé qui répond à la norme Algérienne NA 442 et européenne EN CE 197-1. Les analyses chimiques sont établies au laboratoire de la cimenterie de Sidi Moussa à Timoktene (W Adrar). La composition minéralogique a été calculée par les formules de Bogue corrigées, les résultats sont représentés dans le tableau II.09.

Tableau II.09 : Caractéristique physique et chimique du ciment (à compléter).

Composition chimique et minéralogique du ciment (%)		Caractéristique physique et mécanique du ciment	Unité	Valeurs	Norme
Valeur analyse	Valeur norme				
CaO SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ SO ₃ MgO CaOlibre	2.5 ± 0.5 1.7 ± 0.5	Densité apparente	Kg/m ³		
		Densité absolue	Kg/m ³		
		Consistance normal	%	33	26.5 ± 2
		Surface spécifique Blaine	Cm ² /g	3405	3700 - 5200
		Début de prise	min	240	150 ± 30
		Fin de prise	min	40	230 ± 50
		Retrait à 28 j	µm/m		< 1000
C3S C2S C3A C4AF	60 ± 3	Résistance mécanique		2j	28j
	7.5 ± 1	Compression	MPa		
		Valeur norme	MPa	≥ 10	≥ 52.5

II.5.2. Les additions minérales :

Les additions minérales qui seront utilisés sont des fillers arrivants de concasseur Harouchi situés à l'ouest de la ville d'Adrar (zone des carrières Koussane Bousane).



Figure II.05 : Fillers calcaires HAROUCHI.

Tableau II.10 : Caractéristique physique et chimique du Fillers concasseur Harouchi.

Composition chimique (%)		Caractéristiques physiques	Valeurs
SiO ₂	30,56	Densité apparente	/
Al ₂ O ₃	5,53	Densité absolue	/
Fe ₂ O ₃	8,88	Surface spécifique	/
CaO	24,99	Blaine	
MgO	6,68	Fines < 63 μm	/
SO ₃	2,24	PAF	25.58
		LSF	20.28
Type des Fines :			

Avec :

✚ PAF : Perte au feu ;

✚ LSF : Facteur de saturation en chaux donné par :

$$\text{LSF} = 100 (\text{CaO} + 0,75 \text{MgO}) / (2,855 + 1,18 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Si $\text{LSF} > 99$ \diamond Cuisson difficile et augmentation de la chaux libre

Si $\text{LSF} < 90$ \diamond Cuisson facile et faible consommation d'énergie.

II.5.3. Eau de gâchage :

Pour la confection des différents bétons, l'eau potable de la ville d'Adrar sera utilisée.

II.5.4. Adjuvant :

Les adjuvants permettent d'obtenir une grande fluidité et une parfaite homogénéité qui sont nécessaires à l'obtention d'un BAP.

L'adjuvant qui sera utilisé est un super-plastifiant haut réducteur d'eau à base de poly-carboxylates modifiés type MEDAFLOW 145, de masse volumique 1065 kg/m³, de pH = 5 - 6, de teneur en chlore < 1 g/L et l'extrait sec = 30 \pm 1.5 (%). Dosage d'utilisation recommandé varie de 0.3 à 2 % du poids du liant.

II.5.5. Les granulats :

Les granulats utilisés ont été apportés à partir de concasseur Harouchi et des dunes de ksar Bouda.



Figure II.06 : Plan de situation de concasseur Harouchi.

II.5.6. Le sable :

Le sable utilisé est un sable roulé, siliceux de dune de la sablière Bouda photo :



Figure II.07 : Sable des dunes de Bouda

II.5.7. Les graviers :

Les graviers qui seront utilisés seront des graviers concassés, de roche naturelle calcaire de fractions (3/8 et 8/15) arrivants de concasseur Harouchi situés à l'ouest de la ville d'Adrar (zone des carrières Koussane Bousane).



Figure II.08 : Concasseur Harouchi.

II.6. Caractéristiques physiques :

Les différentes caractéristiques physiques et mécaniques des granulats sont données par les tableaux suivants :

Tableau II.11 : Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers [L.T.P.S].

Caractéristiques physiques	Unité	Gravillon 3/8	Gravier 8/15
		Concasseur Harouchi	
Densité apparente (NA 255)	Kg/m ³	1210	1280
Densité absolue (NA 255)	Kg/m ³	2670	2660
Essai Los Angeles (NA 458)	%	22,16	21,42
Essai Deval (NA 460)	%	41,40	33,60
Coef. d'Aplatissement (NA 256)	%	46,74	32,57
Teneur en eau (NA 451)	%	0,41	0,37
Coefficient d'absorption (NA 255)	%	2,64	2,04

Tableau II.12 : Caractéristiques physiques et mécaniques de Sable de dune et Fillers calcaires [L.T.P.S].

Caractéristiques physiques	Unité	Sable de dune	Fillers
		Bouda	Concasseur Harouchi
Densité apparente (NA 255)	Kg/m ³	1540	\
Densité absolue (NA 255)	Kg/m ³	2640	
Pourcentage des fines	%	0,97	-
Surface spécifique Blaine (NA 231)	cm ² /g	-	2561
Valeur en bleu de méthylène VB (NA 1948)	g clorant/kg	0.02	0,58
Teneur en eau (NA 451)	%	0	0
Coefficient d'absorption (NA 255)	%	0,36	-

Conclusion :

La deuxième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux locaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques (Ciment, filler, super-plastifiant, sable et gravier.) pour la confection du béton, les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université d'Adrar et L.T.P.S.

Chapitre III

Formulation

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. Certains 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, les propriétés les plus importantes pour la mise en œuvre du BAP sont la fluidité, la viscosité, et la résistance envers la ségrégation.

Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ces propriétés sur béton frais. Ils vont du complexe et coûteux rhéomètre à béton, jusqu'au simple cône servant la mesure de l'étalement (Slump Flow).

III.2 Formulation et mise en œuvre du béton :

La formulation des BAP est plus complexe à mettre en évidence à cause de l'absence d'une méthode générale et précise de formulation et le nombre de paramètres qui entre en jeu (ciment, sable, additions, adjuvants et eau) et de leurs natures à celle de béton ordinaire. La plupart des formulations de BAP sont conçues actuellement de manière empirique.

Les différentes approches de formulation sus citées sont basées sur l'optimisation soit de la pâte de ciment, ou soit du squelette granulaire.

Notre formulation va combiner entre les deux approches :

- ❖ Optimiser le volume de la pâte par l'ajout des fillers de 0 à 50 % (avec un pas de 10%) du poids du ciment.
- ❖ Optimiser le squelette granulaire par le choix des méthodes comme Dreux-Gorisse ou Faury.
- ❖ Optimiser le dosage du super-plastifiant de 0,5 à 2% (avec un pas de 0.5%) du poids du ciment.

III.2.1 Optimisation du squelette granulaire par la méthode "DREUX-GORISSE" [9] :

a)- Choix de la méthode :

Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantiers et ayant donnée une satisfaction. Elle est d'autre part très simple d'utilisation puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés ; pour réaliser une composition à partir de cette méthode il est toujours loisible de procéder à quelques essais en faisant varier les proportions des différents granulats pour vérifier que l'amélioration de la maniabilité est réalisable.

b)- Tracé de la courbe granulaire de référence :

La composition granulométrique optimale est représentée par une ligne brisée OAB : le point O est l'origine de la courbe, soit O (0.080,0), et le point B est confondu avec le point d'ordonnée 100% de la courbe granulométrique du plus gros granulat, et le point de brisure A des coordonnées ainsi définies :

En abscisse :

Si $D \leq 20$ mm, l'abscisse est $D/2$;

Si $D \geq 20$ mm, l'abscisse est située au milieu du segment délimité par D ;

Et par le tamis de maille 5 mm, c'est-à-dire $(D+5)/2$;

En ordonnée :

$$y = 50 - \sqrt{D} + k + k_s.$$

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, et de la forme des granulats, en particulier du sable (roulé ou concassé), et la puissance de la vibration. Ce terme est donné par le tableau III.01 :

Tableau III.01 : les valeurs de terme correcteur K.

Vibration		faible		normale		Puissante	
		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment Kg/m ³	400 + super plastifiant	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

c)- Contrôle des qualités des granulats :

On a : $D_{\max} = 16$ d'où : $D/2=8$

- Vérifications des propriétés du sable (essai de l'équivalent de sable) :

$ES=94.86 \%$

- Vérifications des propriétés du module de finesse :

$M_f = 1.99$

On a gravier concassé donc :

$K_s = 6M_f - 15$

$K = 0$ (car on a gravier concassé)

Ainsi que le module de finesse est de 1.99, et sable roule.

D'où $k_s = -3.06$

L'ordonnée du point A est : $y=50 - \sqrt{16} + 0 - 6.03 + 10 = 52.94$

Son abscisse est $16/2 = 8$.

Alors les trois points sont :

O (0.080,0)

A (8 ; 52.94)

B (16 ; 100)

Soit v le point sur la courbe granulométrique du sable correspondant à un tamisât de 95% et w celui sur la courbe du gravillon correspondant à un tamisât de 5%.

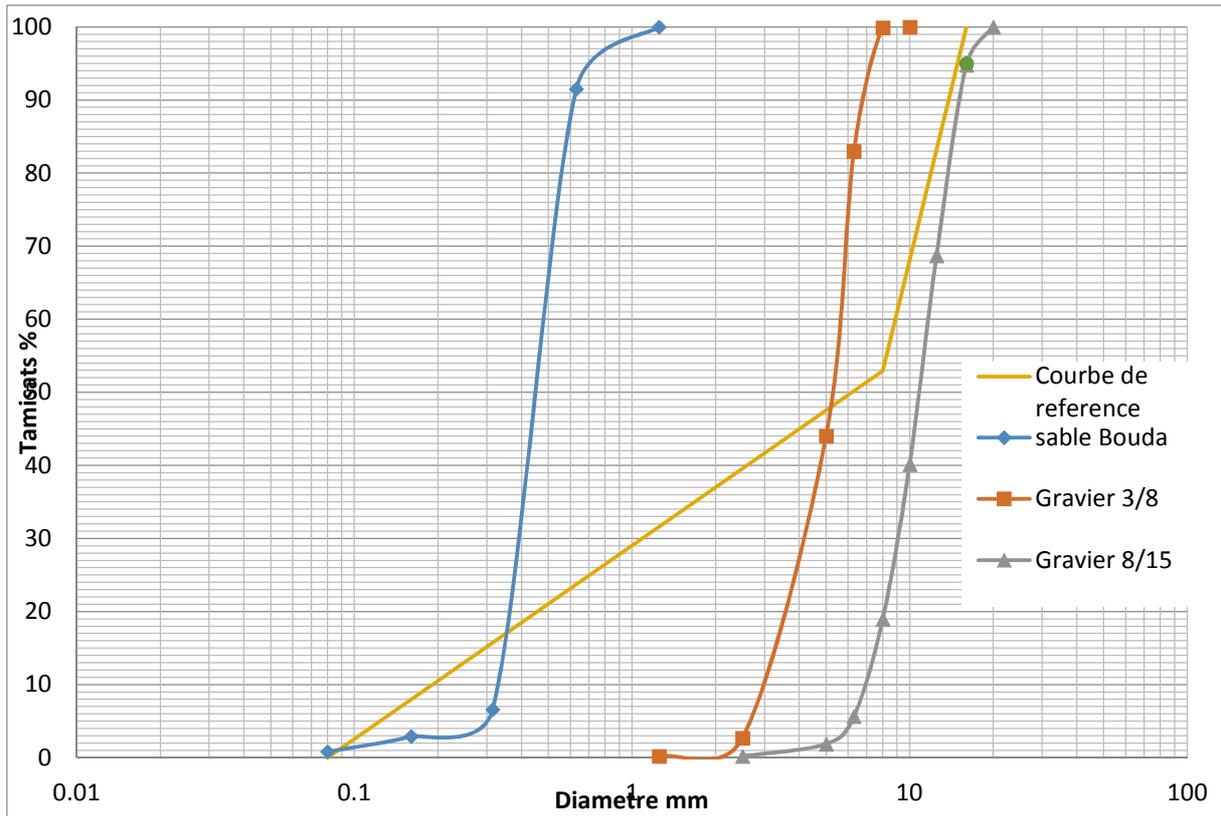


Figure III.01 : Courbe d'analyse granulométrique.

Les pourcentages respectifs de sable et de gravier à utiliser pour le mélange :
 35% de sable, 14% de gravier 3/8 et 51% de gravier 8/15.

d)- Dosage en ciment et en eau :

Données de base :

D'après la formule suivante :

$$f_c = GF_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

On détermine $\frac{C}{E}$:

$$\frac{C}{E} = \frac{f_c}{Gf_{CE}} + 0.5$$

D'après le tableau suivant : $G = 0.40$ car nous avons (granulats bonne, courant) et
 $10mm \prec D \leq 15mm$:

Tableau III.02 : valeurs du coefficient granulaire G.

Qualité des granulats	Dimensions des granulats		
	Petites $D \leq 10mm$	Moyens $10mm < D \leq 15mm$	Gros $15mm < D$
Excellent	0.45	0.40	0.35
Bonne	0.40	0.35	0.30
Passable	0.35	0.30	0.25

$$f_c = f_{c28} + 8MPG \quad \text{On a } f_{c28} = 25 \text{ MPa}$$

Donc : $f_c = 33 \text{ MPa}$.

On a aussi la class de résistance :

$$F_{CE} = 52.5 \text{ MPa}$$

$$D'où : \frac{C}{E} = 2.07.$$

Pour un dosage en ciment de 400 kg/m^3 , on a un dosage en eau de $400 / 2.07 = 193 \ell$

La correction en pourcentage sur le dosage en eau :

$$E_T = E + e$$

D'après le tableau suivant :

Tableau III.03 : correction en pourcentage sur le dosage en eau.

Dimension maximale D en mm	5	8à10	12.5à16	20à25	30à40	50à63.5	80à100
Correction sur le dosage en eau (en %)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

$$e = 4 \% E = 7 \ell.$$

On aura donc :

$$E_T = 193 + 7 \ell \quad \text{Donc : } E_T = 200 \ell.$$

Nous avons trouvé précédemment que le rapporte $G/S=0.89$, Alors nous avons faire une correction sur les volumes en pourcentage pour obtenir $G/S=1$ selon la recommandation du BAP. Donc la correction fait selon le tableau suivant III.04 :

Tableau III.04 : Le volume initial et le volume corrigé.

	Fines	G 3/8	G 8/15	Totale
volume initial	35,00%	14,40%	50,60%	100%
Volume corrigé	51,00%	18,00%	31,00%	100%

Donc le tableau III.05 montre les compositions de notre béton par $1m^3$ avec les nouveaux pourcentages qui est on a corrigé déjà :

Tableau III.05 : la composition pondérale du béton par $1m^3$ après la correction.

Les composants	Les pourcentages	Le volume absolu en (ℓ)	Le poids (kg)
Sable+fillers	51	342.19	889.70
G 3/8	18	120.77	327.29
G 8/15	31	208.00	552.52
Eau T		40.27	

Donc la courbe de mélange pour $G/S=1$ comme suite :

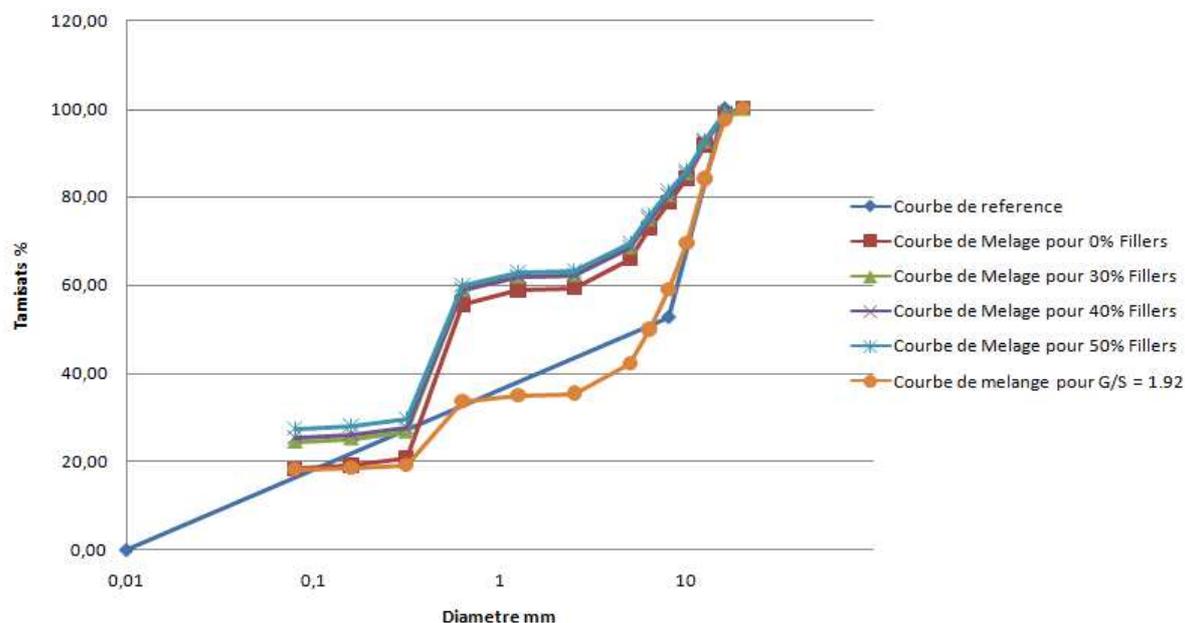


Figure III.02 : Courbe de mélange.

III.2.2 Optimisation de la granulométrie des gravillons :

Dans la formulation des BAP, l'optimisation de la granulométrie des gravillons a une importance capitale, car elle peut avoir des effets considérables sur la maniabilité. En fait, la granulométrie désirée des BAP est essentiellement caractérisée par sa dimension maximale et ses proportions de grains de même dimension. Ces deux facteurs étant principalement fixés par une maximisation de la compacité et la capacité de remplissage des BAP. Cette phase consiste donc à sélectionner, en premier lieu, une classe granulométrique des gravillons se caractérisant par sa taille maximale, puis à trouver une combinaison massique des proportions de grains de même dimension déterminant la distribution granulométrique.

Avant de confectionner nos mélanges, nous avons mesuré, pour chaque combinaison des gravillons utilisés, la compacité obtenue dans une éprouvette cylindrique de (16, 32 cm) remplie sans tassement ou vibration.

Donc on à quatre formulations des BAP :

Tableau III.06 : les différentes constituions qui nous avons utilisés pour les formulations des bétons.

compositions (kg/m3)	BAP 0%FC	BAP 30%FC	BAP 40%FC	BAP 50%FC
Ciment	400	400	400	400
Filler Calcaire	-	120	160	200
Sable	890	829	808	788
Gravier 3/8	327	305	298	291
Gravier 8/15	560	522	510	498
Sec	2177	2177	2177	2177
Eau	200	200	200	200
E/C	0.50	0.50	0.50	0.50
G/S	1	1	1	1

III.3 Malaxage des bétons :

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est une bétonnière a axe incline d'une capacité de 30 litres.



Figure III.03 : malaxeur utilisé.

Le programme de malaxage comme suite :

- ❖ Introduction des granulats dans la bétonnière et pré-humidification pendant 10 minutes avec une partie de la quantité d'eau de gâchage égale à 3% de la masse totale des granulats ;
- ❖ Introduction du liant équivalent (ciment + addition) et malaxage pendant 30 secondes avec les granulats ;
- ❖ Introduction de l'eau de gâchage restante avec une partie de l'adjuvant (super-plastifiant) puis malaxage pendant 90 secondes;
- ❖ Introduction de la partie restante de l'adjuvant (super-plastifiant) et malaxage pendant 2 minutes.

Et afin de prendre en considération les conditions climatiques extrêmes de notre région, un malaxage frais sera fait à une température de 50°C ainsi les éprouvettes préparées à partir de ce malaxage seront conservées à une température de 35°C.

III.4 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais :

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.

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'étalement au cône 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 600 à 750 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. Il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier.

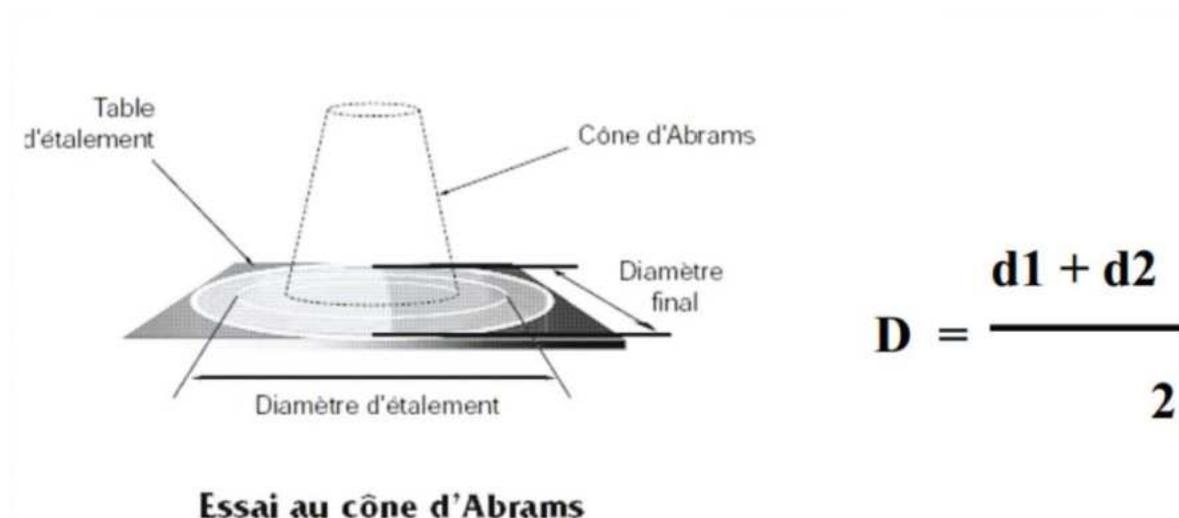


Figure III.04 : Essai au cône d'Abrams

➤ **Objet d'étalement (slump flow) :**

- L'essai d'étalement ou slump flow est utilisé pour caractériser la fluidité du béton.

➤ **Matériel nécessaire :**

- Plateau équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane (type table DIN) constituant un carré d'au moins 90 cm de côté.
- 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 opératoire :**

- 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 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 côtés perpendiculaires.
- Noter le résultat des deux valeurs. Exemple : ((68/70cm)). Si les deux valeurs diffèrent de plus de 5 cm, l'essai doit être invalidé et reconduit.
- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenue, en arrondissant au centimètre supérieur.



Figure III.05 : Essai d'étalement

III.4.2 Essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11] :

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 (2 litres) 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 du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %.



Figure III.06 : Essai au tamis.

➤ **Objet de l'essai :**

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.

➤ **Matériel utilisé :**

- Seau de 10 L + couvercle.
- Tamis 5 mm diamètre 315 mm + fond.
- Bascule : précision minimale 20 g, portée minimale 20kg.



Figure III.07 : Stabilité au tamis.

➤ **Mode opératoire :**

- Echantillonnage.
- En laboratoire : Malaxer, verser directement 10 litres de béton dans le seau.
- Temps d'attente entre l'arrêt du malaxeur et le prélèvement <30s.
- Sur chantier, BPE amené par camion malaxeur : Malaxer à grande vitesse pendant 1 minute.

- Remplir le seau avec 10 litres de béton directement depuis la goulotte du camion.
- Sur chantier avec centrale, mise en œuvre à la benne : Prélever 10 L de béton en tête de benne à la main écope pour remplir le seau.
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation.
- Attendre 15 mn.
- Peser le fond et le tamis à vide.
- Peser le fond seul.
- Poser tamis+fond sur la bascule.
- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau après les 15mn.
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4,8 kg - tolérance ± 0.2 kg ; verser ce béton au centre du tamis : hauteur de chute du béton de 50 cm ± 5 cm.
- Noter le poids réel lu de l'échantillon.
- Attendre 2 mn.
- Faire la tare.

Peser le fond avec la laitance :

- On a : $P \text{ laitances} = P \text{ fond} + \text{laitance} - P \text{ fond}$
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon.
- $\delta = (P \text{ laitance} / P \text{ échantillon}) * 100$

Critères d'acceptabilité :

Les critères qui suivent sont particulièrement adaptés aux applications de béton autoplaçant en éléments verticaux. La mesure de pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçant de la façon :

- $0\% \leq \%P \text{ laitance} \leq 15\%$ **stabilité satisfaisante.**
- $15\% < \% P \text{ laitance} \leq 30\%$ **stabilité critique** (essai de ségrégation à réaliser in situ).
- $\% P \text{ laitance} > 30$ **stabilité très mauvaise** (ségrégation systématiquement, béton inutilisable). Par ailleurs, la détection d'eau de ressuage lors de l'essai n'est pas acceptable.

Cela induit des risques de tassement, de délavage du parement et d'altération de la perméabilité.

III.4.3 Essai de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10] :

La cohésion armée peut se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. 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 et le diamètre des du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans la partie verticales (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.

➤ Objectif de la boîte en L :

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



Figure III.08 : Essai de boîte L.

➤ Mode opératoire :

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte en L à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 (**fig.**) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H2/H1.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.

A noter que les temps nécessaires pour des écoulements horizontaux respectifs de 20 cm et 40 cm (à matérialiser sur le fond de la boîte en L) peuvent être mesurés pour estimer la viscosité du béton.

III.5 La masse volumique du béton autoplaçant [NF EN 12 350-6] :

Voir été essuyées ou nettoyées, les éprouvettes sont pesées avec une erreur inférieure à 1/1000. La masse volumique est alors calculée en divisant sa le volume de l'éprouvette.

C'est-à-dire : $\rho = M/V$.

La masse volumique exprimée en kg/dm³ car la densité.

Conclusion :

La formulation d'un béton autoplaçant (BAP) est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison des matériaux compatibles et le dosage convenable de chacun de ses constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP (fluidité et homogénéité).

Donc dans ce chapitre la formulation de notre BAP a été basée sur l'optimisation suivant :

- Le volume de la pâte par l'ajout des filler calcaires en 04 dosages ;
- Le squelette granulaire par la méthode graphique de Dreux – Gorisse qui permet de mettre en évidence les classes manquantes ;
- Le dosage en super-plastifiant en 04 doses.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Introduction :

Cette partie présente, les résultats des travaux expérimentaux qui ont été réalisés dans le cadre de notre recherche, ainsi que leur interprétations. Il s'agit des essais de caractérisation propres aux BAP frais. Donc on a fait ces essais pour savoir l'effet des fillers calcaires sur les propriétés des BAP (à base des matériaux locaux).

Les essais ont été effectués selon les procédures décrites par l'AFGC. De plus, pour les essais d'étalement au cône et d'écoulement à la boîte en L.

IV.2 Présentation des résultats :

A partir des mélanges obtenus, il faut procéder à différents essais afin de caractériser les BAP confectionnés. Pour cela, nous utilisons les tests recommandés par l'AFGC.

IV.3 Caractérisation des BAP à l'état frais :

Les résultats des essais, de caractérisation des BAP à l'état frais sont représentés dans le Tableau :

Tableau IV.01 : Les résultats des essais de caractérisation à l'état frais

Addition composition	BAP 0% FC	BAP 30% FC	BAP 40% FC	BAP 50% FC	Les normes
Etalement (mm)	835	800	625	670	SF1 : 500-650mm SF2 : 650-750mm SF2 : 750-850mm
Temps T₅₀₀ (s)	3.00	2.52	2.00	2.00	
Remplissage (%)	100	88	100	100	≥ 80%
Ségrégation (%)	17.25	6.33	11.89	19.75	0% ≤ SR% ≤ 15%
La résistance à 2j (MPa)	14.21	14.23	16.28	24.54	
La résistance à 7j (MPa)	23.21	28.26	26.21	37.96	

IV.4 Règles complémentaires dans la norme NF EN 206/CN (ANNEXE L) :

Le béton autoplaçant doit être caractérisé selon les paramètres des spécifications suivantes :

IV.4.1 Spécifications des classes d'étalement (cône d'Abrams):

Tableau IV.02 : Spécifications les classes d'étalement

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

➤ **Classe SF1** est souvent appropriée :

- aux structures en béton non ou faiblement armées, bétonnées par le haut, avec un libre déplacement du point de remplissage (dalles de maison).
- au bétonnage à la pompe par injection (revêtement de tunnels).
- aux sections suffisamment petites pour éviter de grande longueur de cheminement horizontal (pieux et certaines fondations profondes).

➤ **Classe SF2** est appropriée à de nombreuses applications courantes (par exemple voiles, poteaux, etc.).

➤ **Classe SF3** est normalement produite avec un diamètre maximum des granulats peu élevé (inférieur à 16 mm) et est utilisée pour des applications verticales dans des structures qui comportent un ferrailage dense, ou qui sont de formes complexes.

IV.4.2 Spécifications liées à l'écoulement (boite en L) :

Tableau IV.03 : Spécifications liées à l'écoulement

Classe	Taux de remplissage (%)
PL1	≥ 80% pour 02 armatures
PL2	≥ 80% pour 03 armatures

L'aptitude à l'écoulement est associée à la capacité du BAP à s'écouler de manière homogène dans des zones à forts ferrailages.

L'intervalle d'écoulement est la plus petite maille d'armatures à travers laquelle le BAP doit s'écouler de manière continue pour remplir le coffrage.

- **PL1** pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 80 mm et 100 mm (structures verticales d'habitation types).
- **PL2** pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 60 mm et 80 mm (ouvrages de génie civil types).

IV.4.3 Spécifications sur l'essai de ségrégation au tamis :

Tableau IV.04 : Spécifications sur l'essai de ségrégation au tamis

Classe	Pourcentage de laitance (%)
SR1	≤ 20%
SR2	≤ 15%

La valeur de stabilité au tamis, qui décrit la résistance à la ségrégation, est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité in situ du BAP.

- **Classe SR1** est généralement applicable aux dalles de faible épaisseur et peut également être utilisé dans les applications verticales avec une distance maximale de cheminement de 5 mètres et un intervalle d'écoulement supérieur à 80 mm.
- **Classe SR2** est mieux adapté dans les applications verticales si la distance de cheminement est supérieure à 5 mètres et si l'intervalle d'écoulement est supérieur à 80 mm.

Elle convient également pour les applications verticales avec un intervalle d'écoulement maximum de 80 mm, si la hauteur de chute du béton est inférieure à 5 mètres.

IV.5 : Les résultats :

IV.5.1 L'étalement :

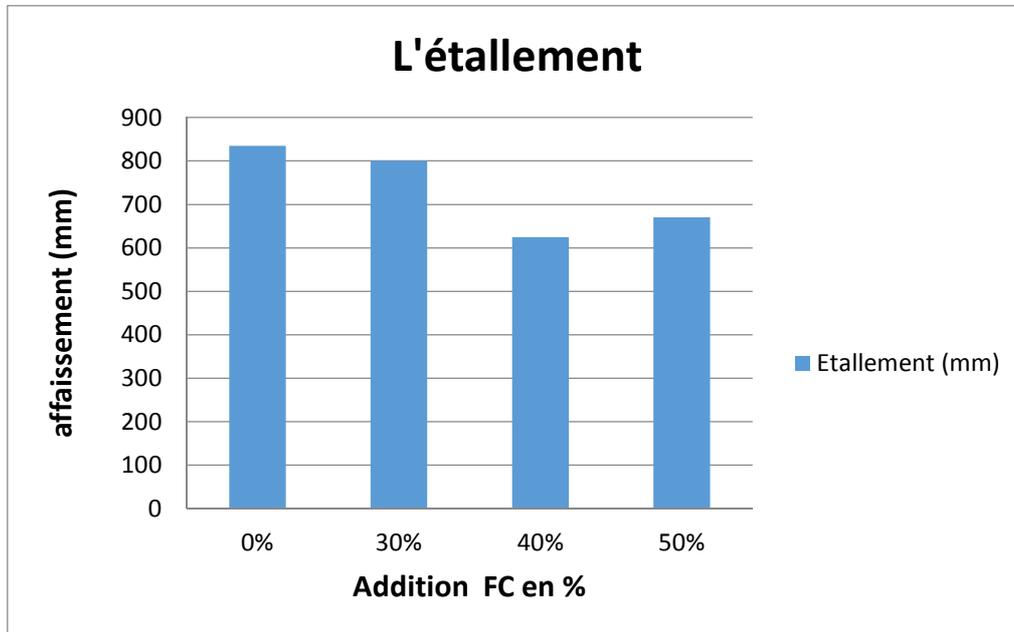


Figure IV.01 : l'étalement en fonction de pourcentage FC.

Nous avons vu des différences de résultats d'affaissement à cause du surdosage d'addition en fillers calcaires et du surdosage de super-plastifiant.

- Pour 0% d'addition nous avons un étalement de class SF3 car l'affaissement entre 750 et 850 mm (SF3 : 750-800 mm).
- Pour 30% d'addition nous avons un étalement de class SF3 car l'affaissement entre 750 et 850 mm (SF3 : 750-800 mm).
- Pour 40% d'addition nous avons un étalement de class SF1 car l'affaissement entre 500 et 650 mm (SF1 : 500-650 mm).
- Pour 50% d'addition nous avons un étalement de class SF2 car l'affaissement entre 650 et 750 mm (SF2 : 650-750 mm).

IV.5.2 Le taux de remplissage :

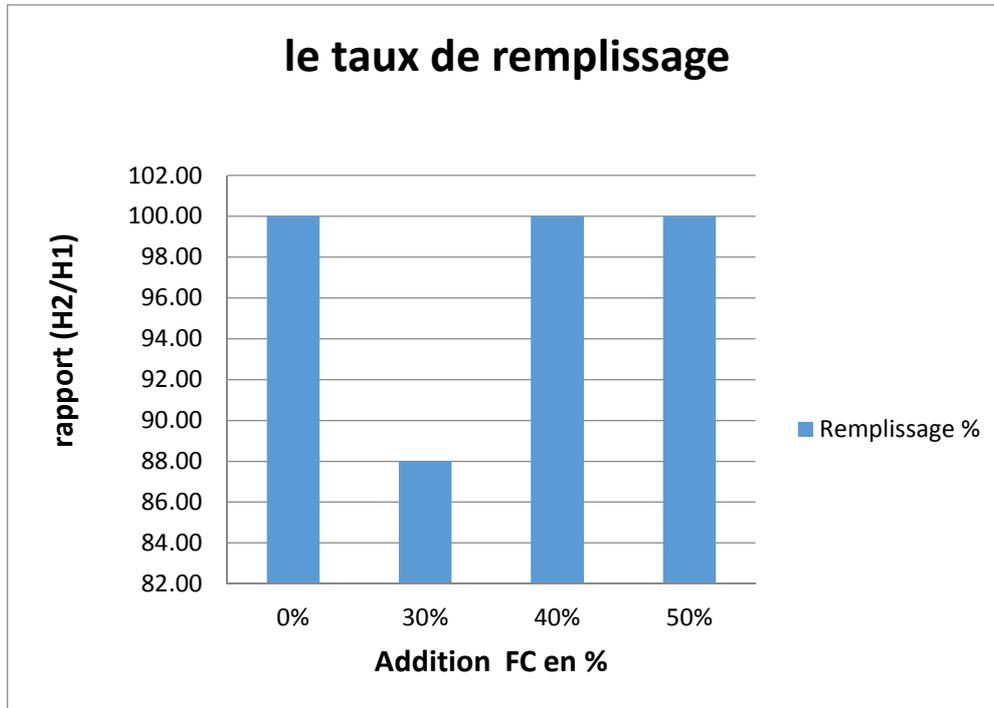


Figure IV.02 : Le taux de remplissage en fonction de pourcentage FC.

IV.5.3 L'indice de ségrégation :

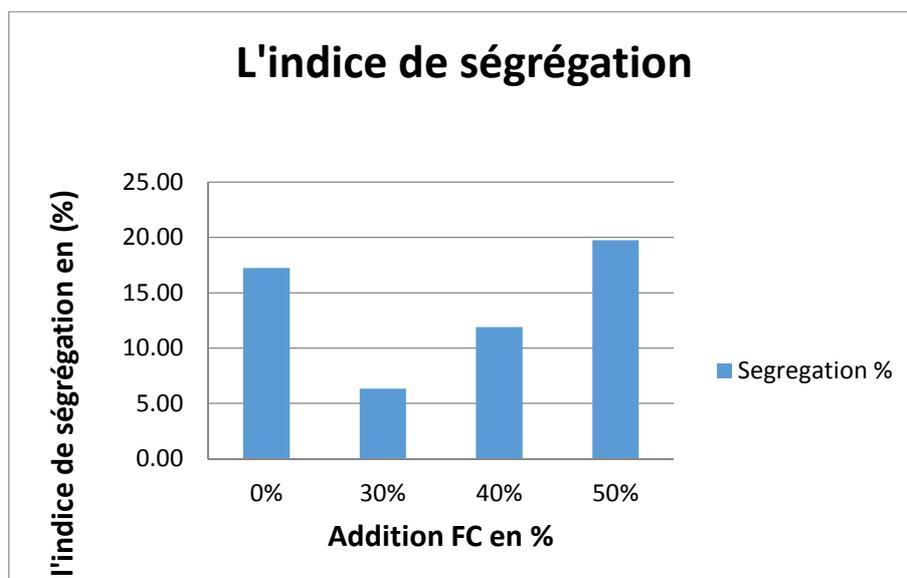


Figure IV.03 : L'indice de ségrégation en fonction de pourcentage FC.

IV.6 Analyse les résultats :

Après l'analyse des résultats des différences essais rhéologique, nous avons abouti aux choix suivants :

- Un béton autoplacant avec addition de 30% pour une consistance de class SF3 (Etalement supérieur à 750mm) avec aucun signe de blocage et de ségrégation (Le taux de remplissage de la boîte en L est de l'ordre 80% et le pourcentage de la laitance inférieur à 15%).
- Un béton autoplacant avec addition de 40% pour une consistance de class SF1 (Etalement entre 500 et 650mm) avec aucun signe de blocage et de ségrégation (Le taux de remplissage de la boîte en L est de l'ordre 80% et le pourcentage de la laitance inférieur à 15%). selon le critère d'acceptabilité, la stabilité au tamis est considéré comme satisfaisante.

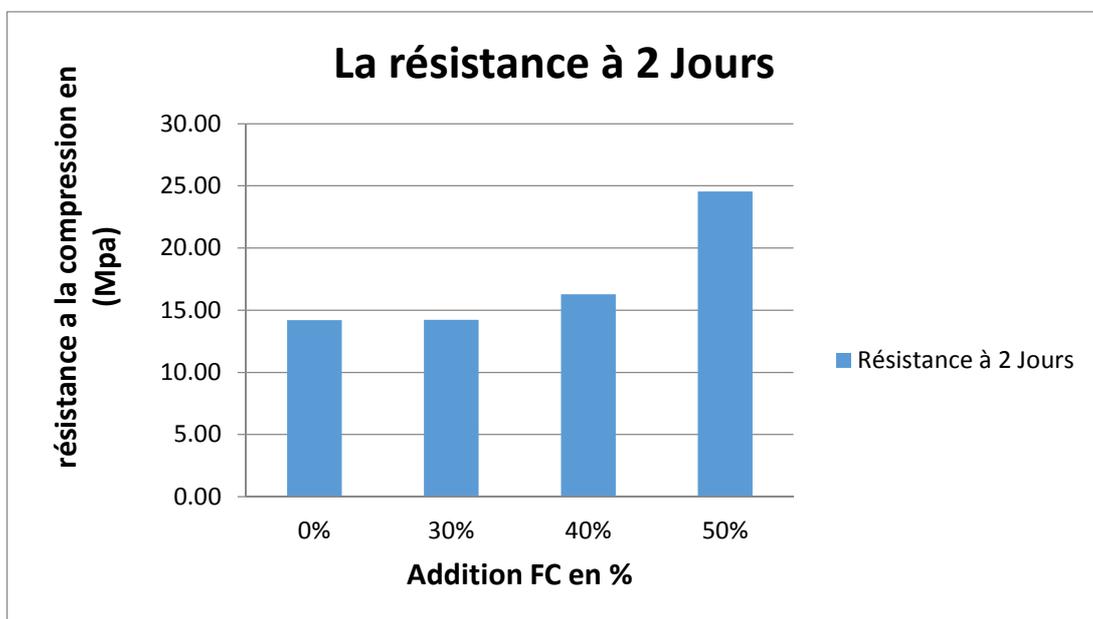


Figure IV.04 : La résistance à la compression à 2 jours en fonction de pourcentage FC.

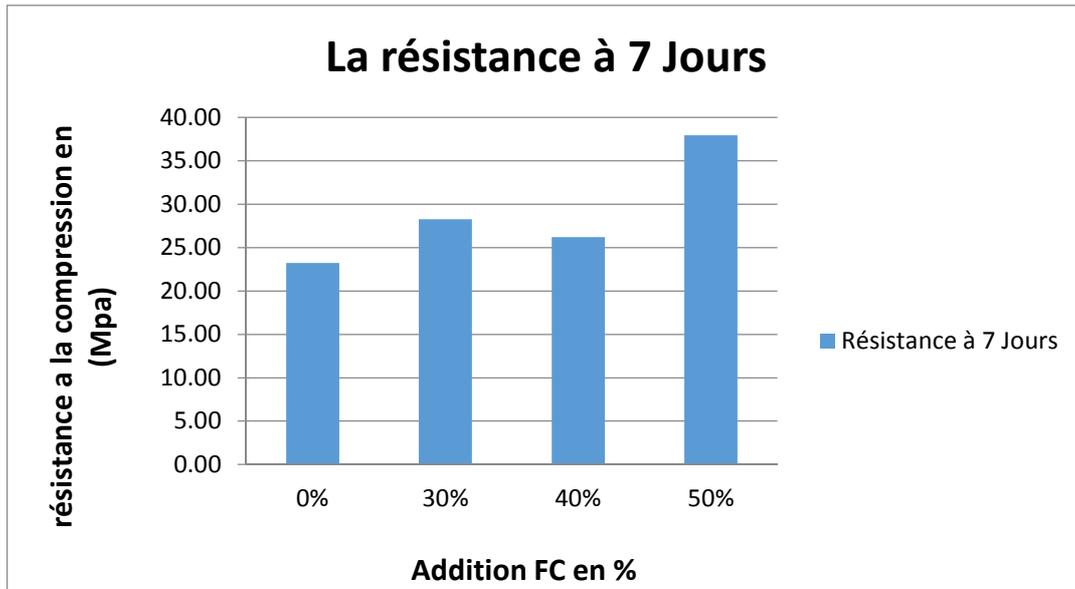


Figure IV.05 : La résistance à la compression à 7 jours en fonction de pourcentage FC.

- Le BAP de 0% d'addition est écarté à cause de signe de ségrégation observée lors de l'essai d'étalement, cône d'Abram et ségrégation au tamis qui sont provoquées par le surdosage du super-plastifiant pris égal à 2% du poids du ciment et nous avons aussi ici une faible résistance au jeune âge.
- Le BAP de 50% d'addition est écarté aussi à cause de signe de ségrégation observée lors de l'essai d'étalement, cône d'Abram et ségrégation au tamis qui sont provoquées par le surdosage d'addition en fillers calcaires malgré sa meilleure résistance au jeune âge.

Donc nous avons vu que les résistances mécaniques augmentent avec le temps par l'ajout de fillers calcaires et l'ajout de super-plastifiant.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les bétons autoplacants (BAP) constituent une nouvelle avancée pour la construction en béton et ils offrent en cela des avantages aussi bien d'ordre économique, technique que sociaux. L'absence de vibration qui caractérise leur mise en place permet en effet de réduire le coût, de construire des éléments à géométrie complexe ou fortement ferrailés et également de constituer une véritable alternative aux bétons traditionnels. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière, les BAP demeurent en dessous de l'utilisation qui pourrait en être faite en raison de questions sans réponses posées par de nombreux industriels et maîtres d'ouvrage. Certaines des inconnues qui les concernent nécessitent donc d'apporter des résultats de recherches probantes, notamment en terme de rhéologie et de durabilité.

L'objectif de ce travail c'est de trouver la bonne combinaison des matériaux locaux compatibles et le dosage convenable de ces constituants pour obtenir une formulation des BAP spécifique à cette région.

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les résistances mécaniques en compression augmentent avec le temps par l'ajout d'addition (fillers calcaires).
- Le surdosage d'addition en fillers calcaires et le surdosage de super-plastifiant il est influé directement sur la rhéologie du BAP et aussi sur les résistances mécaniques.

Référence bibliographique

Référence bibliographique

[1] **HOCINE SIAD**, « Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants », thèse de l'Institut National Des Sciences Appliquées de Toulouse 2010.

[2] **PHILIPPE TURCRY**, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants influence de la formulation », thèse de doctorat l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes le 3 février 2004.

[3] **BEHIM M., ALI BOUCETTA T.** Effet des additions micronisées sur l'écoulement des bétons autoplaçants (laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre) ENSET Oran (Alegria) - Octobre 12-14, 2009.

[4] **FICHES TECHNIQUES TOME 2 LES BETONS** : formulation fabrication et mise en œuvre.

[5] **BOUSSAFER A.** Formulations des bétons autoplaçants par la méthode japonaise D'OKAMURA présenté ; Université Constantine thème master 2010-2011.

[6] **BOUKNI B.** Tenue au feu des bétons autoplaçants, magister en Génie Civil 2007.

[7] **BILLBERG P.** Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, 23-25 octobre 2001.

[8] **BETHMONT S.** Mécanismes de ségrégation dans les BAP In Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 2005

[9] **SEDRAN T.** Les Bétons Autonivelants » mars-avril 1995.

[10] **TURCRY P.** Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation.

[11] **DREUX G., FESTA J.** nouveau guide du béton et de ses constituants ; 2007

[12] **ASSOCIATION FRANCAISE DE GENIE CIVIL «AFGC»**, Bétons autoplaçants – Recommandations provisoires, Juillet 2002.

- [13] **ABDELLAH EL HILALI**. Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons (BAP) : influence des fines calcaires et des fibres végétales. Thèse de l'école doctorale sciences et ingénierie.
- [14] **JOSSERAND L**, Thèse de doctorat en Structures et Matériau, «Ressuage des bétons hydrauliques », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le 11 octobre 2002.
- [15] **HANAA FARES**. Thèse de doctorat en Génie Civil «Propriétés mécaniques et physicochimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée», Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise, le 07 Décembre 2009.
- [16] **BARON J. et OLLIVIER J.P**, « Les Bétons – Bases et données pour Leur formulation », éditions Eyrolles, 1996.
- [17] **HANAA FARES**. Thèse de doctorat en Génie Civil «Propriétés mécaniques et physicochimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée» Ecole Doctorale.
- [18] **AFGC**, Association française de Génie Civil, Recommandations provisoires pour l'emploi des Bétons Autoplaçants, Paris, 2ème édition, AFGC, 64p. (2008).

ANNEXE

BETON PRÊT A L'EMPLOI

MEDAFLOW 145

Conforme à la norme NF EN 934-2 : TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774

**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau**

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 145** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité. Le **MEDAFLOW 145** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 145** ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

- FormeLiquide
- Couleurbrun clair
- pH 5 – 6
- Densité..... 1,065 ± 0,015
- Teneur en chlore..... < 1g/L
- Extrait sec.....30±1,5%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 145** permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- bonne résistances initiale et finales .
- de diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons avec ferrailage dense

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,3 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.33 à 1.8

litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 145** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 60% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.

Par temps chaud, le **MEDAFLOW 145** peut être combiné à un retardateur de prise **MEDARETARD GR**.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 145** est conditionné en bidons de 10 l et fûts de 210 et 240 kg. et cubitainer 1100 kg

Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI :

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la fiche de données de sécurité disponible sur : www.granitex.dz