République Algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE Dr. YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de la Matière
Filière Génie Civil

Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du diplôme de Master
En Génie Civil
Option : Construction et Matériaux

THEME

L'effet de la nature et dimensions des granulats sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques d'un béton Autoplçant

Dirigé par :

- Dr.**O.BOUKENDAKDJI**

Etudié par :

Mr. **RAHIM HAMZA**

Mr. **BELLAL AHMED**

Promotion 2011-2012

REMERCIEMENT

Au terme de ce travail, on remercie en premier lieu Allah qui a donné la force pour achever cette étude.

On remercie nos très chers parents pour leurs soutiens et leurs patiences.
On exprime notre profonde gratitude à notre promoteur: Mr BOUKENDAKDJI.O
Pour ses conseils et ses aides précieuses.

En grande partie, ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de Génie Civil de l'université de Médéa, Nos remerciements s'étalent aussi à Mademoiselle BOUKHELKHAL Djamila, la responsable du laboratoire qui a permis le bon déroulement des expériences du début jusqu'à la fin. Et Mourad, l'ingénieur de laboratoire.

Nos sincères remerciements s'adressent également à tous les enseignants du département de génie civil de l'université de Médéa.
Notre gratitude à tous les membres de jury qui font l'honneur de juger notre travail.
Un grand merci à tous ceux qui contribué de prés ou de loin à l'élaboration de ce projet.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Au premier lieu, nous tenons à remercier « Allah » qui nous a donnée le courage et la Volonté pour terminer ce travail.

Mes chers parents que dieu les protège, pour leurs soutien durant la période de ma formation, pour leurs bienveillance.

Mes sœurs et mes frères et toute ma famille.

Tous mes amis surtout : Elhadi, Toufik rami, Abdeslam, Mustapha, Belkaire, Nabile, Moussa, Khaile, Kamel. Djamel, Rabeh.

Je remercie mon binôme Bellal qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Mes enseignants qui mon contribuer durant ma formation.

Toute la promotion génie civil 2011-2012.

Hamza

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Au premier lieu, nous tenons à remercier « Allah » qui nous a donnée le courage et la Volonté pour terminer ce travail.

Mes chers parents que dieu les protège, pour leurs soutien durant la période de ma formation, pour leurs bienveillance.

Mes sœurs et mes frères et toute ma famille.

Tous mes amis surtout : harizi hafid amro assam riad samir

Je remercie mon binôme Hamza elhadj qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Mes enseignants qui mon contribuer durant ma formation.

Toute la promotion génie civil 2011-2012.

Ahmed

Résumé.

Les Bétons Autoplaçants (BAP) sont des matériaux très fluides qui se mettent en place sans vibration. Afin de garantir une très bonne fluidité avec une homogénéité satisfaisante, ces bétons consomment beaucoup plus de ciment et de superplastifiant. Ces bétons utilisent aussi les ajouts minéraux comme le laitier, la pouzzolane ou les fillers calcaire pour des raisons techniques et environnementales.

Le but de ce mémoire est d'étudier l'effet de la nature et dimension des granulats utilisés dans un mélange de béton autoplaçant sur l'ouvrabilité et les résistances mécanique de ce dernier. Pour cela on fera varier les pourcentages des différents classes de gros granulats (graviers) ,3/8 et 8/15 dans le mélange de Béton Autoplaçants BAP.
Mots clés :
Béton autoplaçant, Granulats, ouvrabilité, Ségrégation, résistance mécanique

ملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا هي مادة عالية السيولة و هي قادرة على التموضع دون الحاجة إلى جهد ميكانيكي. تستهلك الخرسانة المرصوصة ذاتيا الكثير من الأسمنت و المواد الكيميائية (الملدنات الممتازة) وسبب ذالك هو ضمان تدفق جيد مع تجانس مرض. تستعمل الخرسانة المرصوصة ذاتيا كذلك الإضافات المعدنية لأسباب تقنية و بيئية مثل خبث الفرن العالي, البوزولان أو الحجر الجيري.

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة تأثير طبيعة و حجم الحصى المستعملة في خليط الخرسانة المرصوصة ذاتيا على خصائص الخرسانة الذاتية في الحالة السائلة و الصلبة من اجل هذا نقوم بتغيير نسب مختلف أحجام الحصى 8/3 و 15/8 في خليط الخرسانة المرصوصة ذاتيا

و يتوافق هذا مع معرفة قوة الخرسانة المرصوصة ذاتيا من حيث مقاومة الانضغاط و الشد وبخصوصيات ريولوجية و ميكانيكية جيدة.
الكلمات المفاتيح: الخرسانة المرصوصة ذاتية, الحصى, السيلان, الفرز, مقاومة الضغط و الشد.

ABSTRACT

Self-Compacting Concretes (SCC) are very fluid materials that fall into place without vibration. SCC uses a lot more cement and superplasticizer to ensure a very good workability with satisfactory homogeneity. These concretes use also mineral additions such as slag, pouzzolana and limestone for technical and environmental reasons.

The aim of this work is to study the effect of the nature and dimension of aggregates used in a selfcompacted concrete on the workability and mechanical resistances of this latter. For this purpose we vary percentages of the different classes of coarse aggregates (3/8 and 8/15) in the mixture of selfcompacted concrete.
Key words:
Selfcompacting Concrete, Aggregates, Workability, Segregation, Mechanical Resistance

Sommaire

Remerciement

Résumés

Sommaire

Liste des Tableaux

Natation et Abréviation

Introduction Générale …… 1

CHAPITRE 1 : REVUES BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Historique …… 3

1.2. Définition d'un béton autoplaçant…… 4

1.2.1. Avantages techniques…… 5

1.2.2. Avantages socio-économiques…… 5

1.3. Les composants d'un BAP …… 6

1.3.1. Les granulats …… 7

1.3.2. Le ciment…… 8

1.3.3. Les ajouts minéraux…… 9

1.3.3.1. La fumé de silice…… 9

1.3.3.2. Cendres volantes…… 10

1.3.3.3. Laitier des hauts fourneaux…… 10

1.3.4. Les Superplastifiants…… 10

1.3.5 .L'eau de gâchage…… 13

1.3.6. Les agents de viscosité…… 13

1.4. Caractérisation de BAP…… 15

1.4.1. Essais sur mortier frais…… 15

1.4.2. Essais sur béton frais…… 16

1.4.2.1. Essai de l'étalement au cône d'Abrams…… 17

1.4.2.2. Essai J-Ring…… 18

1.4.2.3. Essai de l'écoulement à l'entonnoir (V-funnel)……..…… 19

1.4.2.4. Essai de l'écoulement à la boite en L…… 20

1.4.2.5. Essai de l'écoulement au tube en U…….. 21

1.5. Propriétés d'un BAP à l'état frais…… 22

1.5.1. Capacité au remplissage…… 22

1.5.2. Capacité de passage……..….... 24
1.5.3. Résistance à la ségrégation……... 25
1.5.4. Rhéologie des BAP…….... 26
1.5.4.1. Définition de la rhéologie……..... 26
1.5.4.2 Comportement rhéologique des BAP à l'état frais…….. 28
1.5.5. Facteur clés des propriétés des BAP à l'état frais……. 31
1.6. La formulation des bétons autoplaçants……... 35
1.6.1. Formulation par la méthode générale…… 37
1.6.2. La formulation JSCE…….. 39
1.6.3. Formulation par minimisation du volume de pâte (CBI
Méthode Ou Méthode Suédoise)……..... 40
a. Critère de fluidité…….. 40
b. Critère de non-blocage……. 41
1.6.4. Méthode française (LCPC)……. 42
1.7. Conclusions…… 42

CHAPITRE 02 : LES GRANULATS

2.1. Introduction …….. 44
2.2. Définition d'un granulat…… 44
2.3. Classifications normalisés des granulats…….. 45
2.3.1. Classification selon la provenance…… 45
2.3.2. Granulats naturels d'origine industrielle……. 46
2.3.3. Les granulats lourds…… 46
2.3.4. Les granulats légers ……. 46
2.3.5. Les granulats réfractaires…….. 47
2.3.6. Les granulats recyclés……... 48
2.4. Caractérisation et propriétés des granulats pour béton …… 48
2.4.1. Caractéristiques physiques……. 48
2.4.1.1. La masse volumique absolue……... 48
2.4.1.2. La masse volumique réelle…….. 48
2.4.1.3. La masse volumique apparente…….. 49
2.4.1.4. Absorption…….. 49
2.4.1.5. Porosité et compacité…….. 50
2.4.1.6. Teneur en eau…….. 50
2.4.1.7. Propriété et forme des granulats…….. 51

2.4.1.7.1. Propriété des granulats……. 51
2.4.1.7.2. Formes des granulats…… 51
2.5. Caractéristiques mécaniques et méthodes des mesures…… 52
2.5.1. Résistance à l'usure des gravillons…… 52
2.5.2. Résistance à la fragmentation des gravillons…… 52
2.5.3. Propriétés chimique et durabilité des granulats……. 52
2.5.4.Essais sur granulats ……. 53
2.5.4.1. Essai d'équivalent de sable : (NF P 18-598)……. 53
2.5.4.2. Module de finesse : (NF P 18-304)…… 53
2.5.4.3. Masse volumique ……. 53
2.5.4.4. Taux d'absorption des granulats ……..... 54
2.5.4.5. Essai Los Angeles : (NF P 18-573)…….. 54
2.6. Conclusion…… 54

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET METHODES

3.1. Introduction …… 55
3.2Matériaux ……..... 55
3.2.1. Ciment …….. 55
3.2.2. Granulats……..… 55
3.2.3. Sable…….. 55
3.2.4. Gravier…… 57
3.2.5. L'eau de gâchage 59
3.2.6. Le Superplastifiant …….. 59
3.3. Méthodes d'essais …… 59
3.3.1. Essais sur béton à l'état frais…… 59
3.3.1.1. Essais d'étalement au cône d'Abrams et T50…… 59
3.3.3.2. Essai d'entonnoir en V (V-funnel) ……..…… 61
3.3.2.3. Essai de stabilité au tamis…….. 62
3.3.2. Essais sur béton à l'état durci…… 63
3.4.1. Essai de Compression…….. 63
3.4.2. Essai de traction…… 64
3.4. Séquences de malaxage…….. 65
3.5. Récapitulatif du programme des essais réalisés…….. 66
3.6. Conclusion ……..... 68

CHAPITRE 04 : INTERPRETATIONS DES RESULTATS

4.1. Effet de la dimension des granulats sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais….. 69

4.1.1. Etalement et Temps T50 au cône d'Abrams …….. 69

4.1.2. Temps d'écoulement par l'essai d'Entonnoir en V (V-Funnel).. 70

4.1.3. Etalement, Temps T_{50J} et Différence de hauteur BJ au cône… 72

4.1.4. D'Abrams en présence du J-Ring ……... 73

4.1.5. Différence de hauteurs au cône d'Abrams …….. 75

4.1.6. Résistance à la Ségrégation par Tamisage …… 76

4.2. Effet de la dimension des granulats sur les résistances mécaniques des BAP à l'Etat durci…… 77

4.2.1. Résistance à la Compression …….. 78

4.2.2. Résistance à la Traction…… 79

Conclusion Générale et Recommandations …… 80

Référence

Liste des figures

Figure 1.1: Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect â l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP…… 6

Figure 1.2: Critère de blocage et géométrie du calcul…… 8

Figure 1.3: Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment…… 12

Figure 1.4**:** Particules de ciment recouvertes de polymères à fort Encombrement stérique …… 12

Figure 1.5: Essai d'étalement pour les mortiers…… 16

Figure 1.6: Essai d'entonnoir pour les mortiers……. 16

Figure 1.7: Essai d'étalement (slump flow)…… 16

Figure 1.8: Essai J-Ring…… 17

Figure 1.9: schématisation de l'essai de l'entonnoir (V-funnel)…… 18

Figure 1.10: Schématisation de l'essai du tube en U…… 19

Figure 1.11: Mesure du temps d'écoulement à l'Essai d'Orimet…… 20

Figure 1.12: Caisson : vue frontale et vue latérale…… 21

Figure 1.13: Rhéogramme du corps de Bingham et profil de vitesse en conduite…. 24

Figure 1.14: Rhéogramme d'un fluide newtonnien et d'un binghamien…… 24

Figure 1.15: Rhéomètre IBB……. 27

Figure 1.16: Rhéomètre BTRHEOM…… 31

Figure 2.1: les diamètres des granulats…… 45

Figure 3.1: Sable fin de Hassi Bahbah……. 56

Figure 3.2: Sable grossier de Mont Guorno…….. 56

Figure 3.3: Courbe granulométrique des sables utilisées et leur mélange…… 57

Figure 3.4: Gravier de Mont Guorno 3/8. …….. 57

Figure 3.5: Gravier de Mont Guorno 8/15…… 57

Figure 3.6: Courbe granulométrique des graviers utilisés…….. 58

Figure 3.7: Protocole de l'essai d'étalement au cône d'Abrams…… 61

Figure 3.8: Protocole de l'essai d'entonnoir (V-funnel) …… 62

Figure 3.9: Protocole de l'essai de stabilité au tamis …… 63

Figure 3.10 : Essai de compression…… 64

Figure 3.11**:** Essai de flexion en quatre points…… 64

Figure 3.12: Séquence de malaxage du béton autoplaçant……. 65

Figure 3.13: Malaxage du béton autoplaçant…… 66
Figure 3.14: Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais…… 67
Figure 3.15: Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci…… 68
Figure 4.1: Etalement en fonction des dimensions des granulats…… 71
Figure 4.2: Temps d'Ecoulement T50 en fonction des dimensions des granulas… 72
Figure 4.3: Temps d'écoulement à l'Entonnoir en V en fonction des dimensions des granulats…… 73
Figure 4.4: Etalement sans et avec J- Ring avec PC en fonction des dimensions des granulats…… 74
Figure 4.5: Temps d'Ecoulement T50 sans et avec J-Ring en fonction des dimensions des granulats…… 74
Figure 4.6: Différence de hauteurs BJ en fonction de la dimension des granulats…. 75
Figure 4.7: Résistance à la Ségrégation au Tamis en fonction Des dimensions des granulats…… 76
Figure 4.8: Variation de la Résistance à la Compression en fonction du Temps…. 78
Figure 4.9: Variation de la Résistance à la traction en fonction du Temps…… 79

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Essais permettant la détermination de la capacité de remplissage……. 22
Tableau 1.2 : Essais permettant la détermination de la capacité de passage…… 25
Tableau 1.3 : Essais permettant la détermination des paramètres rhéologiques des BAP…… 28
Tableau 2.1 : Densité des granulats lourds…… 46
Tableau 2.2 : type de granulats légers…… 47
Tableau 3.1 : Caractéristiques physico-chimiques du ciment CEM I 42.5…… 55
Tableau 3.2 : Propriétés physiques d'identification des sables utilisés…… 56
Tableau 3.3 : Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés…… 58
Tableau 4.1 : Composition des BAP testés…… 69
Tableau 4.2 : Résultats d'essais d'ouvrabilité…… 70
Tableau 4.3 : Résultats des résistances mécaniques en fonction de la dimension Des granulats…… 77

Notations et abréviations

A	Quantité d'air
CPA CEM I 42.5	Ciment Portland ordinaire dont la résistance minimale à la Compression à 28 jours est de 42,5 MPa
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
C	Ciment
BAP	Bétons autoplaçants
BAN	Bétons autonivelants
BO	Bétons ordinaires
G	Gravier
G_{lim}	Volume absolu en gros granulats
M	Mortier
MAP	Mortier autoplaçant
M_b	Module de basicité
P	Poudre (Ciment + ajouts)
P	Pourcentage de laitance
S	Sable
Sp	Superplastifiant
V_w	Volume d'eau
V_p	Volume de pâte
V_{vides}	Volume des vides

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement le béton est l'un des matériaux les plus employés dans le domaine du bâtiment ou de génie civil à travers le monde. En effet sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité, sa tenue au feu et son faible coût, contribuent à accroitre son utilisation. Toutefois, le matériau béton doit s'adapter de manière continue à de nouvelles exigences et nouveaux besoins.

Afin d'adapter les bétons à des ouvrages d'une forme architecturale complexe (formes variables et courbures multiples) ou caractérisés par une forte concentration en armature, ou même de réduire les nuisances sonores dues à l'utilisation de vibration au moment du coulage du béton, une étape supplémentaire est franchie avec les bétons autoplaçants (BAP) dont les performances couvrant ainsi celles des bétons ordinaire et de haute performance.

L'idée de création des BAP a été lancée vers le milieu des années 80 par les chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été reprise rapidement par les grands groupes industriels Japonais pour des projets d'envergure. Malgré qu'une vingtaine d'années a passée après son développement, les BAP sont encore à l'heure actuelle qualifiés de nouveaux béton car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement. Ces bétons sont élaborés selon une formulation spécifique : fort dosage en sable et en éléments fins (calcaire, laitier ou cendres volantes), emploi de superplastifiants et éventuellement d'un agent chimique qui permet d'assurer l'homogénéité du mélange. Les BAP doivent être très fluide tout en conservant une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires peuvent être obtenues par l'emploi des superplastifiants à un dosage optimal et un dosage élevé en ciment qui le caractérise par rapport aux bétons ordinaires. Cependant, les superplastifiants peuvent augmenter les risques de ségrégation et de sédimentation dans le béton. Le fait de leur associer des agents de viscosité aide à maintenir les granulats en suspension et permet au béton de garder un squelette granulaire bien réparti dans tout le volume.

Malgré les avantages pratiques des BAP, leur point faible réside dans leur coût qui est relativement plus élevé que les bétons ordinaires en raison de l'emploi du superplastifiant et un dosage important en ciment, limitant ainsi son utilisation.

En effet, notre travail s'inscrit dans la Détermination de l'effet de la nature et les dimensions des granulats sur l'ouvrabilité et la résistance mécanique sur le béton autoplaçant.

Le but de ce travail est d'étudier l'influence des granulats, ses dimensions et ses proportions sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques d'un béton autoplaçant. Pour cela le travail a été répartie en plusieurs chapitres comme suit :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le béton autoplaçant, notamment les différents aspects de caractérisation de leurs propriétés intrinsèques tels que, la formulation, les propriétés mécaniques et la durabilité.

Le deuxième chapitre présente les Granulats ainsi que leur nature et leurs caractéristiques avec les déférents essais des granulats.

Le troisième chapitre a été consacré aux caractéristiques des matériaux utilisés et les formulations qui ont été adoptées pour réaliser le travail expérimental dans le cadre de cette étude. Ensuite, nous exposons aussi les différents essais caractérisant le BAP à l'état frais.

Le chapitre quatre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats des différents essais réalisés.

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

CHAPITRE 1 :

Revues bibliographique

1.1.Historique

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 extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème **[1][2].** C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçant ou béton autonivellant). La nécessité de ce type de béton a été proposée par OKAMURA en 1986 **[3] [4]**. Des études pour développer le béton autoplaçant y compris une étude fondamentale sur l'ouvrabilité du béton ont été effectuées par OZAWA et ses collègues à l'université de Tokyo **[5] [6]**.

L'idée d'un béton fluide ou béton autoplaçant (BAP) est apparue en 1989, alors que les japonais avaient besoin d'un béton qui n'exige pas une main d'œuvre nombreuse et qualifiée, et qui fournisse une résistance à la compression élevée à jeune âge pour pouvoir augmenter la productivité. Ainsi, le progrès et l'évolution en génie civil dans différentes applications telles que les ponts suspendus, les grattes ciel et surtout la grande orientation de l'usage des bâtiments vers une utilisation spécifique et une qualité architecturale accrue, ont été les enjeux concrets du développement des bétons fluides. **[2,7]**

L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années, mais il est en plein essor. En France le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) se penche sur la question au début des années 90. Les premières applications en grandeur réelle sont réalisées au début de 1988, à Brest, sur le chantier d'extension du parc de loisirs Océanopolis pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferraillés. Aussi lors de la construction d'un collège dont les façades sont inclinées, à géométrie complexe, et des formes non répétitives excluant toute possibilité de préfabrication. **[8]**

Dans des cas particuliers, le BAP peut être considéré comme un béton autonivelant (BAN). Cette dénomination n'est pas utilisée par tous les auteurs, puisque certains d'entre eux font la distinction entre le béton autoplaçant et le béton autonivelant, le premier terme étant employé lorsqu'il s'agit d'un coulage vertical et le second correspondant à une mise en œuvre horizontale. **[9,10]**

Le premier article sur le béton autoplaçant a été publié en 1989 par OZAWA **[12] [13]**, et en 1992 OZAWA et d'autres collègues ont présenté un papier sur ce sujet à une conférence internationale de béton tenu à Istanbul **[14]**. Cette présentation a accéléré l'intérêt international pour le béton autoplaçant.

En 1998 le premier atelier international sur le béton autoplaçant été tenu à Kochi au Japon. A travers les efforts de Ozawa et ses collègues une recherche plus intensive prospérée, particulièrement à de grandes compagnies de construction en Asie et en conséquence le béton autoplaçant été employé pour la réalisation de plusieurs structures comme des ponts, tunnels, bâtiments, etc. **[3] [15]**.

1.2. Définition d'un béton autoplaçant

Les bétons autoplaçants (BAP), sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement. **[12]**

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en oeuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

La fluidité des bétons autoplaçants est due à une quantité de fine élevée et à l'utilisation des superplastifiants. Ces adjuvants spécifiques issus de technologie moléculaire récente permettent de réduire de manière importante le volume d'eau, tout en conférant au béton autoplaçant une importante fluidité, ils assurent aussi le maintient de l'ouvrabilité du béton durant un temps déterminé. Une nouvelle famille d'adjuvants, appelés agents de viscosité, entre également parfois dans la formulation des BAP qui vont donner une viscosité à la pâte **[16]**.

En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire **[3]**:

1.2.1. Avantages techniques

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

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

1.2.2. Avantages socio-économiques

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

- une diminution du bruit sur site
- une diminution de la pénibilité des tâches
- une réduction des risques d'accident
- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.
- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage.

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

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

1.3.Les composants d'un BAP

Les BAP sont des bétons à quatre composants : les granulats, le liant, l'eau et les ajouts.

Les granulats et le ciment utilisés pour un BAP sont les mêmes que ceux utilisés pour la fabrication d'un béton ordinaire. Ce qui particularise la composition des BAP, c'est la proportion des différents constituants et non pas leurs propriétés.

En plus des granulats, la formulation d'un BAP se distingue par la présence d'un ajout chimique et /ou minéral. **[17,18]**

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

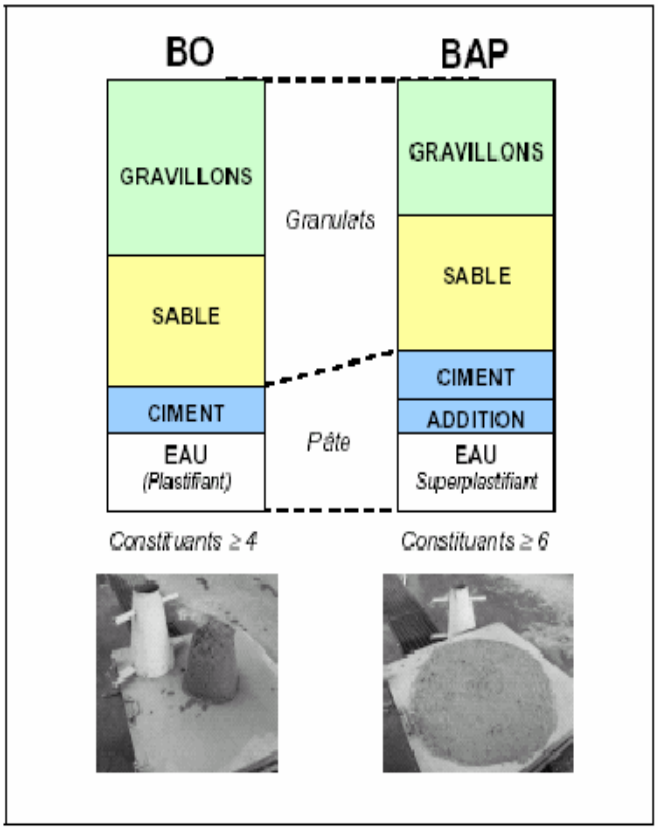


Figure 1.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP

1.3.1. Les granulats :

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, toutefois, comme pour un béton ordinaire, la forme des granulats a une influence sur le comportement rhéologique. Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés.

Les granulats roulés présentent par ailleurs un plus petit vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus petite quantité de pâte de ciment pour le remplir.

Les granulats permettent tout d'abord de réduire considérablement le coût global du béton (cinq fois moins chers que le ciment), mais leur influence est déterminante sur la résistance mécanique du béton à l'état durci. La résistance mécanique du béton dépend fortement de la nature des granulats (propriétés intrinsèques), et de la compacité du squelette global, ainsi que l'adhérence entre les granulats et la pâte du béton. **[20]**

D'autre part le sable est un facteur important pour la fabrication du BAP vu qu'il a une influence déterminante sur ses propriétés à l'état frais. Si la proportion de sable augmente par rapport au gravier, la demande en eau et le rapport E/C augmentent, tandis que la viscosité diminue. Et inversement en cas de diminution de la proportion de sable. Le sable présente une demande en eau réduite lorsque sa teneur en fines est faible **[21]**.

D'autre part la flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est meilleure, raison de leur plus grande surface spécifique à masse identique.

Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 15 mm.

Dans sa thèse Bethmont **[22]** explicite que la taille maximale D_{max} des granulats, étant un facteur non négligeable, peut provoquer un blocage. Il apparaît que le risque de blocage, pour un ferraillage donné, augmente lorsque le diamètre maximum des granulats augmente. Jin **[23]** reporte que Fujiwara et al, ont calculé, dans le cas d'un ferraillage unidirectionnel (ferraillage vertical uniquement) et dans le cas d'un ferraillage bidirectionnel (ferraillage verticale et horizontal), un espacement

minimum au-delà duquel le risque de blocage diminue. Ils obtiennent les critères présentés sur la figure 1.2 **[23]**:

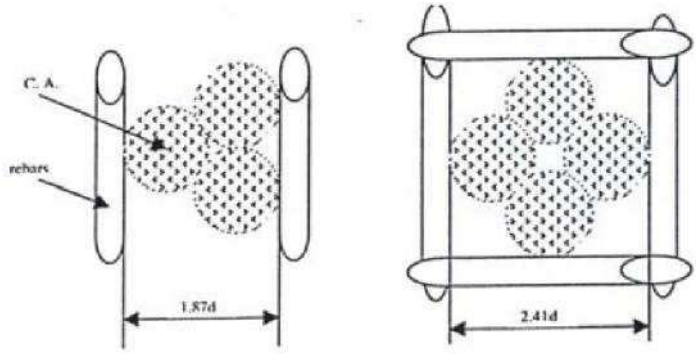


Figure 1.2 : Critère de blocage et géométrie du calcul, Jin **[23]**

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

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

1.3.2. Le ciment

Les ciments les plus courants dans le monde du génie civil, sont les ciments à base de clinker Portland, produit obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique, un composant majeur du clinker. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, en liant les différents constituants. Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) nécessaire pour régulariser la prise, c'est à dire faire en sorte que le béton (ou la pâte de ciment) reste en phase dormante pendant une période suffisamment longue (de l'ordre d'une heure et demi) avant le passage à l'état solide. Cette phase est propice à la réalisation des tests d'écoulement puisqu'on considère que la structure de la matrice n'est pas modifiée par le processus d'hydratation. Différents types de ciment existent sur le marché, et se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. Ainsi, le choix du type de ciment, est conditionné par les performances souhaitées du béton (résistance à la compression, temps de début de prise, etc.).

Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié aux propriétés mécaniques et de durabilité du béton. Le rapport E/C est un facteur très influent sur les différents aspects des bétons. Ce rapport a toujours été associé directement à la résistance mécanique du béton et sa durabilité, et la formulation des bétons ordinaires passaient par l'optimisation de ce phénomène. Toutefois, l'introduction de nouveaux matériaux (additions minérales, adjuvants avec un extrait sec solide) porte un intérêt particulier à l'utilisation de la concentration volumique en solides puisque ce paramètre prend en compte tous les constituants du béton **[20]**.

1.3.3. Les ajouts minéraux

- ***les produits artificiels***
    - les laitiers,
    - les cendres volantes,
    - le fumé de silice,
    - l'argile calcinée (méta kaolin)
    - les déchets d'incinération
    - les déchets de briques concassées

- ***les produits naturels***
    - la pouzzolane naturelle (cendres volcaniques, scories)
    - le calcaire
    - l'argile opaline
    - Les additions siliceuses (sable)

1.3.1.1. La fumé de silice

Le fumé de silice est un sous produit industriel résultant du dépoussiérage des fumées issues des fours à arcs électrique dans lesquels sont élaborés du silicium et autres alliages. La fumée de silice se combine avec l'oxygène de l'air pour sonner de l'oxyde de silicium SiO_2 en quantité prédominante (> 90%)

La taille fines de ses particules permet d'étendre la granulométrie de l'ensemble du squelette granulaire en comblant les vides et en augmentant la compacité. En plus, sa

structure amorphe permet de déclencher une réaction pouzzolanique par la consommation de la chaux et la création de nouveaux hydrates.

1.3.3.2. Cendres volantes

Les cendres volantes sont de fines particules résultats de la combustion du charbon dans central électrique. En 1937 R. E. Davis de l'université de Californie présenta une étude sur l'utilisation des cendres volantes en cimenterie et depuis les études se sont multipliées et son utilisation très répandue à cause des améliorations apportées et l'économie enregistrée par son emploi

1.3.3.3. Laitier des hauts fourneaux

Le laitier des hauts fourneaux est un sous produit de l'usine sidérurgique formée essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une fois sorti du four, il subira un refroidissement rapide avec un jet d'eau qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment. L'utilisation de ce sous produit date de plus d'une centaine d'années où on enregistre la première production d'un ciment au laitier en Allemagne (1892) puis au USA (1896).

1.3.4. Les Superplastifiants

Les superplastifiants sont des formes avancées de plastifiants. Ce sont des produits qui peuvent être ajoutés au béton en plus petite quantité que les plastifiants, soit au plus 2% du poids du ciment, sans pour autant créer des effets secondaires (effet retardateur excessif, entraînement d'air). La compétition entre l'effet de défloculation et le ressuage détermine l'influence globale des superplastifiants sur la zone de transition inter faciale. Selon le rapport E/C utilisé, les superplastifiants peuvent avoir un effet bénéfique ou délétère. Avec un E/C de 0.55, le ressuage est dominant, ce qui occasionne une zone de transition inter faciale de moindre qualité dans la plupart des cas. Il s'agit par contre d'une situation extrême puisque l'utilisation des superplastifiants n'est généralement pas nécessaire à un tel rapport eau/ciment. Avec un E/C de 0,4, le compromis entre la défloculation et le ressuage se reflète bien, par l'excès de conductance inter faciale, l'ajout de superplastifiant et l'augmentation de son dosage apporte une meilleure dispersion des grains de ciment mais favorise

également le ressuage. Le meilleur compromis est au point de saturation, où l'excès de conductance inter faciale est semblable avec et sans superplastifiant **[24]**. D'après des résultats antérieurs sur le même projet, à un E/C de 0,35, ces superplastifiants ont un effet bénéfique sur la zone de transition inter faciale. En conséquence, l'utilisation des superplastifiants comme réducteurs d'eau peuvent améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

Il existe plusieurs générations de superplastifiants, correspondant à différents polymères ou différentes configurations de ces polymères, qui ont été élaborées au cours des dernières années **[24]**. Les superplastifiants peuvent être regroupés de la manière suivante:

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

En effet, ils sont composés d'une chaîne chargée venant s'adsorber à la surface des particules, sur laquelle sont greffées d'autres chaînes se déployant dans la solution. Uchikawa et al. **[25]** prouvent, pour la première fois, l'action des forces stériques responsables de la dispersion dans une pâte de ciment. Ces forces sont prépondérantes suivant la nature du polymère. Un polymère branché conduit à un effet stérique important du fait des longues chaînes, alors qu'un polynaphtalène est régi par l'effet électrostatique. Neubauer et al. **[26]** ont montré que l'effet stérique est très important dans la défloculation des pâtes de ciment.

Néanmoins, suivant la nature du superplastifiant utilisé les deux effets sont combinés, avec parfois une prédominance de l'un des deux. Nous pouvons ainsi distinguer, de manière très simplifiée, les polyélectrolytes (ancienne génération) des polymères greffés **[28]** (nouvelle génération). El-Barrak dans sa thèse **[21]** souligne que l'effet des polyélectrolytes, comme leurs noms le laissent supposer, est basé sur les répulsions électrostatiques. Ils viennent s'adsorber à la surface des particules de ciment créant ainsi une force répulsive par la présence de charges de même signe. Flatt et al. **[28]** étudient l'adsorption de superplastifiants sur des poudres modèles,

avec un PH et un potentiel zeta identiques à celui d'une pâte de ciment. Ils relient la répulsion électrostatique au potentiel zeta.

.

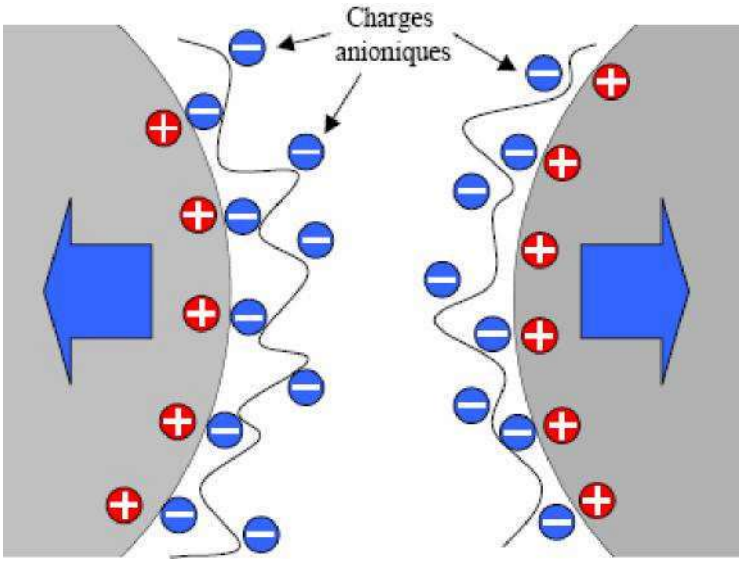


Figure 1.3 : Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment **[21]**

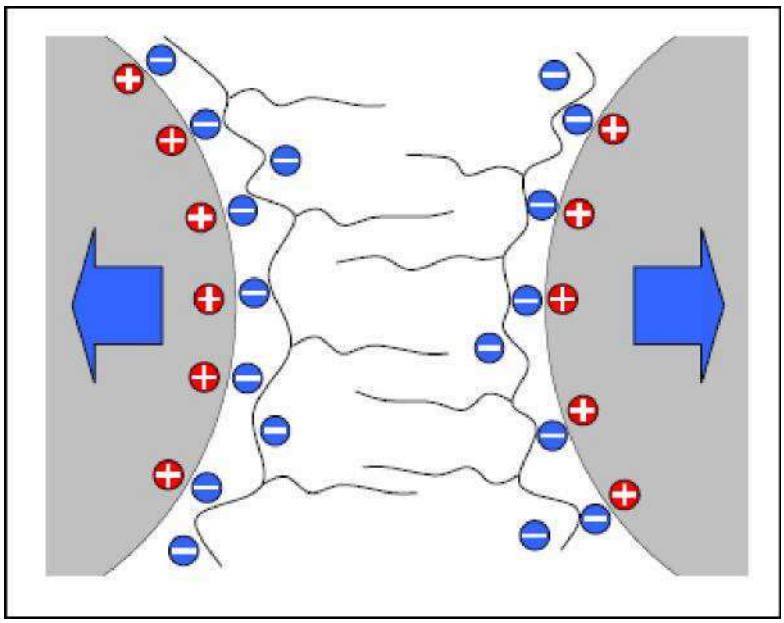


Figure 1.4 : Particules de ciment recouvertes de polymères à fort encombrement stérique **[21]**

Les phénomènes d'incompatibilité ciment- superplastifiant sont dus à une interaction entre le superplastifiant et le sulfate de calcium (gypse - $CaSO_4 - 2H_2O$) contenu dans le ciment, en empêchant ce dernier de débloquer l'hydratation du C_3A en formant une coquille d'ettringite. Ce problème d'incompatibilité se présente surtout dans les bétons à faible E/C (BHP). Dans tel cas on remarque une perte de fluidité (affaissement) rapide. Cependant, cette incompatibilité est très rarement remarquée dans les bétons avec un E/C > 0,5. En plus, Agarwal et al **[33]** ont trouvé que la compatibilité du superplastifiant avec le ciment dépend plus de la qualité du ciment ou du liant. Ainsi le ciment de classe 52,5 est plus compatible que les classes 32,5 et 42,5. En plus ils ont trouvé que le ciment au laitier était compatible avec tous les superplastifiants qu'ils ont utilisés. **[29]**

1.3.5 .L'eau de gâchage

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés **[30]** qui peuvent étériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, des armatures, etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats. **[29]**

L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent. Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. König et al **[31]** ont utilisé, avec succès, de l'eau recyclée pour la fabrication d'un béton autoplaçant dans le cadre de béton prêt à l'emploi

1.3.6. Les agents de viscosité

Généralement les superplastifiants diminuent la viscosité du béton, ce qui rend le matériau plus sensible vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Les agents de viscosité ont, eux, la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils sont utilisés (ce rôle peut aller du simple épaississement

jusqu'à la gélification) et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation.

Les agents de viscosité peuvent être de différentes natures :

- Polysaccharide obtenu par fermentation microbiologique du type gomme welan ou gomme de xanthane ;
- Dérivés cellulosiques à base de méthyle cellulose, d'hydroxy-éthyl cellulose ;
- Colloïde naturel ;
- Suspension des particules siliceuses.

Le mode d'action des agents de viscosité se fait par adsorption des molécules d'eau sur les longues chaînes du polymère induisant un gonflement du polymère qui augmente la viscosité de l'eau et par conséquent celle de la pâte de ciment.

En général les agents de viscosité utilisés sont des polysaccharides hydrosolubles **[32].** Khayat et al. **[32]** ont fixé 3 catégories générales pour les agents de viscosité : les polymères naturels, semi-synthétiques et synthétiques.

Les agents de viscosité possèdent un rôle très important pour maintenir la stabilité des mélanges cimentaires. Ils assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements libres d'eau, réduisant le ressuage. Au niveau rhéologique, ils agissent en augmentant à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité des mélanges **[32].**

Les agents de viscosité peuvent avoir une seconde fonction, le retard de prise, ainsi que l'entraînement d'une certaine quantité d'air, entraînant des conséquences sur la résistance mécanique du béton. Les effets secondaires sont fonction du type et du dosage de l'agent de viscosité utilisé.

1.4. Caractérisation de BAP

Les caractéristiques principales des BAP résident dans les propriétés du béton à l'état frais, c'est-à-dire la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation. La caractérisation de ces propriétés peut être réalisée avec des moyens

et un niveau de précision très variables. En effet, il n'existe pas d'essai standard ni de critère associé pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. Pour pallier cette lacune, les chercheurs ont développé différents types d'essais sur mortier et sur béton **[34] [35]**.

1.4.1. Essais sur mortier frais

Des tests sur les mortiers sont réalisés car :

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

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BAP lui même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement. Un seuil de cisaillement entre 20 et 50 Pa et une viscosité plastique entre 6 et 12 Pa.s ont été suggérés comme appropriés **[34] [35]**.

La mesure du seuil de cisaillement et de viscosité plastique nécessitent un rhéomètre, dans le cas ou cet appareil est non disponible, des essais alternatifs plus simples sont proposés pour évaluer la fluidité du mortier comme l'essai d'étalement et l'essai de l'entonnoir (V-funnel) qui, ont été utilisés par plusieurs chercheurs (Figures 1.5 et 1.6) **[34]**.

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur plaque en verre, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. Dans l'essai de l'entonnoir (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.

Nawa et al **[36]**, ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultané d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10s produisent un BAP réussi. Quand à Chai, qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 s **[37]**.

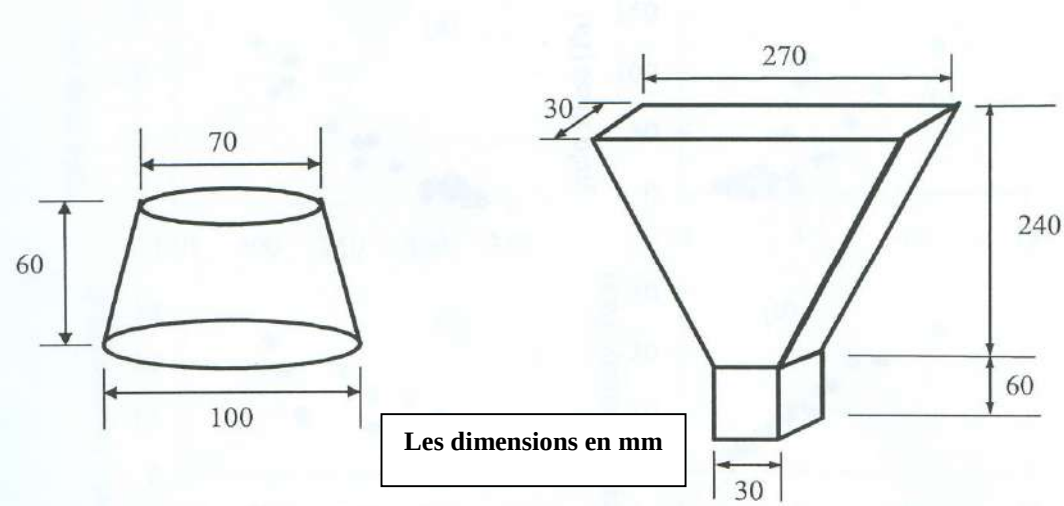


Figure 1.5 : Essai d'étalement pour les mortiers

Figure 1.6 : Essai d'entonnoir pour les mortiers

1.4.2. Essais sur béton frais

Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier termes qualitatifs de fluidité, hétérogénéité et absence de blocage. Nous présentons dans cette partie les principaux tests d'ouvrabilité pour la caractérisation des bétons autoplaçants.

1.4.2.1. Essai de l'étalement au cône d'Abrams

C'est l'essai le plus courant pour évaluer la fluidité du béton, car il est très simple à réaliser sur chantier. Ce test nécessite un cône d'Abrams et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 50 cm (figure 1.7).

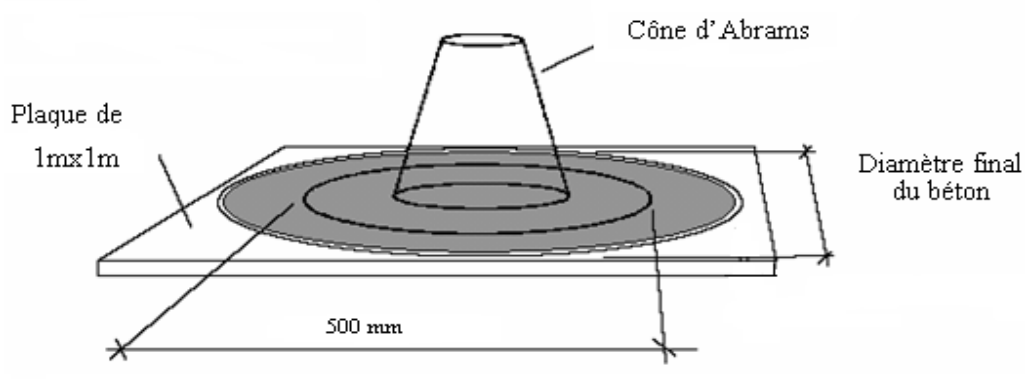


Figure 1.7: Essai d'étalement (slump flow)

L'essai consiste à mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône, ainsi que le temps au passage à un diamètre de 50 cm **[40]**.

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre qui caractérise la fluidité, plus il est grand plus le béton est fluide (capacité de remplissage élevée). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50 cm et 80 cm en fonction de l'utilisation du béton **[41] [42]**.

Cet essai permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier). **[19]**

Le tems de passage de la galette de béton à un diamètre de 50 cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. LeT_{50}, est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T_{50} traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Toutefois, le T_{50} est une valeur difficile à mesurer, surtout pour le cas des bétons très fluides ; lancer et arrêter le chronomètre au moment où le cône est levé et où le béton passe au diamètre de 50 cm est une estimation subjective. En général, pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes **[43][44]**. Cependant, centrés avant de relever le cône et d'observer l'étalement du béton à travers les armatures. Les dimensions de l'anneau,

des armatures et les espacements entre les armatures sont différents selon les auteurs et les pa ortées par **[45]** : les certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons autoplaçants avec une faible vitesse de déformation **[46][47]**.

1.4.2.2. Essai J-Ring

L'essai du J-Ring (Japanese Ring) consiste à associer un anneau d'armatures à l'essai de l'étalement au cône d'Abram. L'anneau d'armatures et le cône d'Abrams (Figure 1.8) sont centrés avant de relever le cône et d'observer l'étalement du béton à travers les armatures. Les dimensions de l'anneau, des armatures et les espacements entre les armatures sont différentes selon les auteurs et les pays. Nous citons quelques dimensions rapportées par **[48] [49]** : les diamètres des armatures et les espacements entre armatures peuvent varier respectivement dans les plages 10-16 mm et 34-48 mm. Le diamètre de l'anneau varie entre 23.5 et 30 cm.

Le test J-Ring permet d'évaluer la différence entre le comportement du béton sans et avec obstacles. Ainsi, l'essai de l'étalement au cône d'Abrams doit être effectué deux fois, la deuxième fois en utilisant l'anneau d'armatures

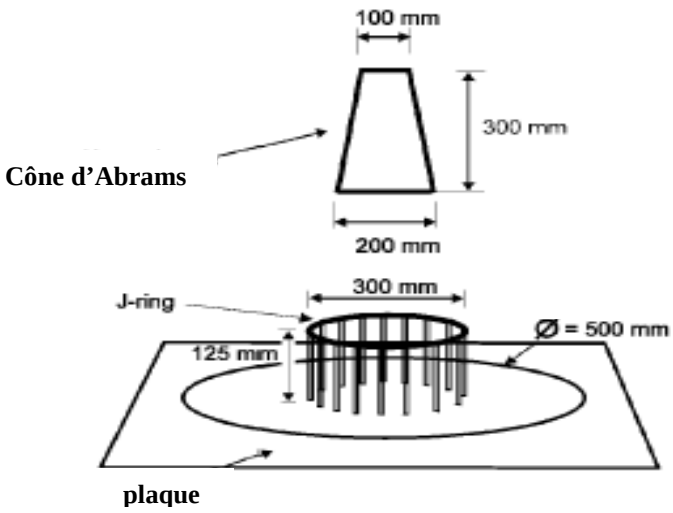


Figure 1.8 : Essai J-Ring

Le test J-Ring permet d'évaluer la différence entre le comportement du béton sans et avec obstacles. Ainsi, l'essai de l'étalement au cône d'Abrams doit être effectué deux fois, la seconde fois en utilisant l'anneau d'armatures. La différence entre les diamètres moyens des deux essais met en évidence la perte de

remplissage due à la présence d'armatures. Pour un béton autoplaçant cette différence doit être inférieure à 5 cm **[50]**. Cet essai est essentiellement utilisé dans le cas des bétons autoplaçants fibrés.

1.4.2.3. Essai de l'écoulement à l'entonnoir (V-funnel)

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant **[60]** : il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en dimensions différentes, et il 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 (figure1.9).

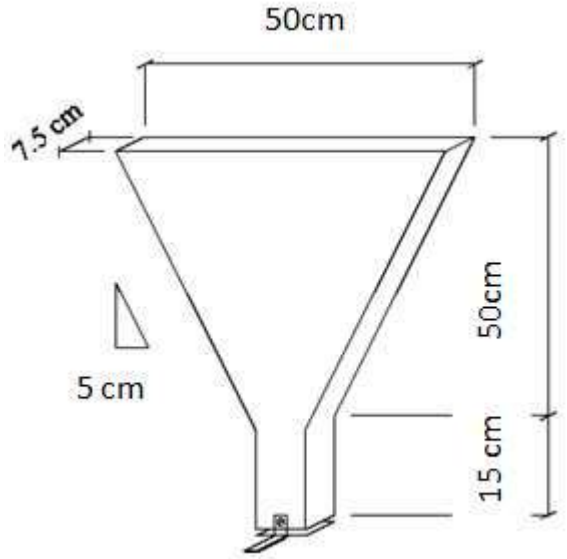


Figure 1.9 : schématisation de l'essai de l'entonnoir (V-funnel)

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. 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 **[51]**.

Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l' entonnoir doit être généralement inférieur à

12 secondes **[50]**. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 secondes et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante **[50]**.

1.4.2.4. Essai de l'écoulement à la boite en L

Cet essai permet de tester l'écoulement du béton à travers des armatures (capacité de Passage), de mesurer le taux de remplissage et le temps d'écoulement du béton.

L'appareillage représenté par la figure 1.10 consiste à laisser passer le béton du compartiment vertical au compartiment horizontal à travers l'espace entre armatures. Des appareillages de différentes dimensions existent sur le marché, ainsi que des armatures de différents tailles et Espacements (la figure 1.9 représente une boite en L de 60 cm de hauteur totale, de 70 cm de longueur et de 20 cm de largeur).

Un béton autoplaçant possède un taux de remplissage $\frac{H2}{H1}$ supérieur ou égal à 0,8 **[40]**. Un blocage quelconque du béton durant le passage à travers les armatures traduit le phénomène de ségrégation.

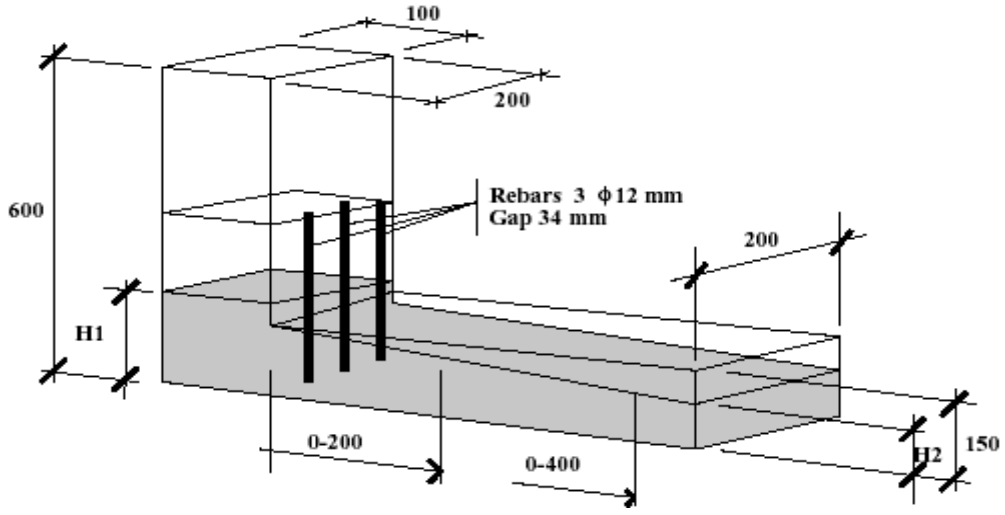


Figure 1.10 : Schématisation de la boite en L

La vitesse de l'écoulement peut être évaluée en mesurant le temps de passage du béton à la ligne des 20 cm et à celle des 40 cm. Les temps de passage sont respectivement notés T_{20} et T40. Certains auteurs **[52]** recommandent des valeurs inférieures à 1,5 secondes pour T20 et inférieures à 3,5 secondes pour T_{40} afin de rester dans un domaine autoplaçant.

1.4.2.5. Essai de l'écoulement au tube en U

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boite en L, l'essai du tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton **[53]**. Le dispositif d'essai (figure 1.11) est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante. Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, et les spécifications des différents pays).

Le béton est travers la grille d'armatures, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint). La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Pour un béton autoplaçant, la hauteur de remplissage est généralement supérieure ou égale à 30 cm **[53][51]**.

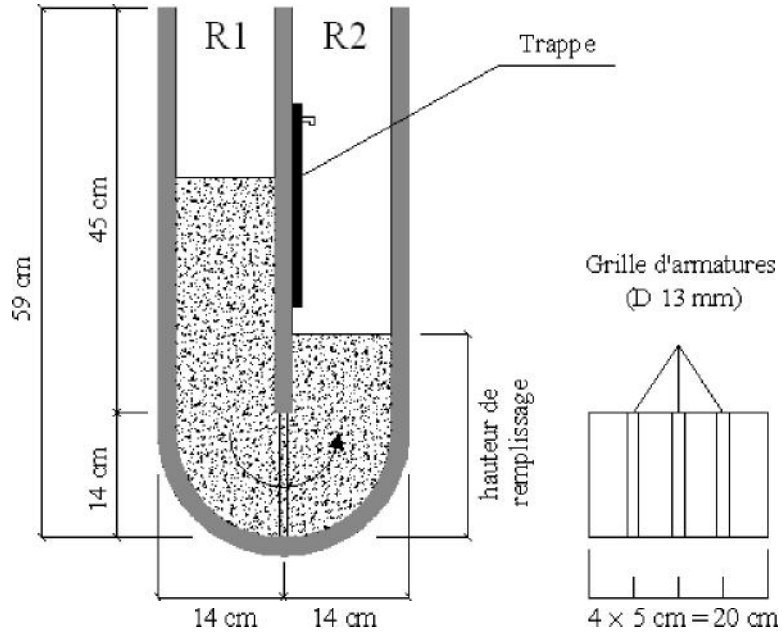


Figure 1.11 : Schématisation de l'essai du tube en U

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

Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage). Les principales propriétés recherchées sur béton frais sont l'autocompaction, la fluidité, la viscosité et la stabilité envers la ségrégation. La formulation du BAP repose sur les mêmes bases technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité). Par contre dans le cas du BAP, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides inter granulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l/m^3. Dans le cas d'un mélange constitué exclusivement de granulats concassés, cette valeur peut même s'élever jusqu'à 100 à 120 l/m^3. Cet excédent constitue une condition indispensable aux propriétés de fluidité exceptionnelles des BAP. Étant donné que le volume des vides du mélange varie en fonction de la nature et de la provenance des granulats, ceci peut entraîner des adaptations et modifications de la composition d'un BAP dans chaque cas particulier. **[29]**

Les guides Européens pour le BAP **[38]**, répartissent les BAP à l'état frais en quatre (04) propriétés essentielles suivantes, et propose des essais à réaliser pour chacune d'elles :

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

1.5.1. Capacité au remplissage

La capacité au remplissage du béton est définie comme l'habilité du béton à entreprendre un changement dans sa forme sous l'effet de son poids propre **[39]**, même dans le cas de présence d'obstacles qui peuvent interférer avec son écoulement. Cette capacité au remplissage peut être déterminée à l'aide de deux dispositifs, le cône d'Abrams et l'Orimet (Tableau 1.1).

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

Propriété	Essais à réaliser
Capacité au Remplissage	• Etalement au Cône d'Abrams (Slump-Flow) • Temps à T_{50} au cône d'Abrams (T_{50} Slump-Flow) • Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel) • Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test) • Etalement au Tube Orimet (Orimet) • Essai du caisson (Fill Box)

a/ Essai Orimet

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

L'opération consiste à remplir l'orimet en béton puis ouvrir la trappe inférieure et mesurer le temps jusqu'à apparition de la lumière au fond de l'orimet en regardant du haut (Figure 1.12). Cette essai mesure la facilité d'écoulement du béton, plus le temps est court plus l'ouvrabilité est grande. Pour un bon béton autoplaçant le temps d'écoulement ne doit pas dépasser 05 secondes **[55]**.



Figure 1.12: Mesure du temps d'écoulement à l'Essai d'Orimet **[29]**

b/ Essai du caisson (Fill Box)

Cet essai est utilisé pour mesurer la capacité au remplissage du béton autoplaçant avec une dimension maximale de granulats de 20 mm. L'appareillage consiste en un container (transparent) avec une surface plate et lisse. A l'intérieur du container il y a 35 obstacles en PVC de 20 mm de diamètre et distances axiales de 50 mm (Figure 1.13). Pour faciliter l'opération de remplissage, le container est muni d'un tube terminé par un entonnoir.

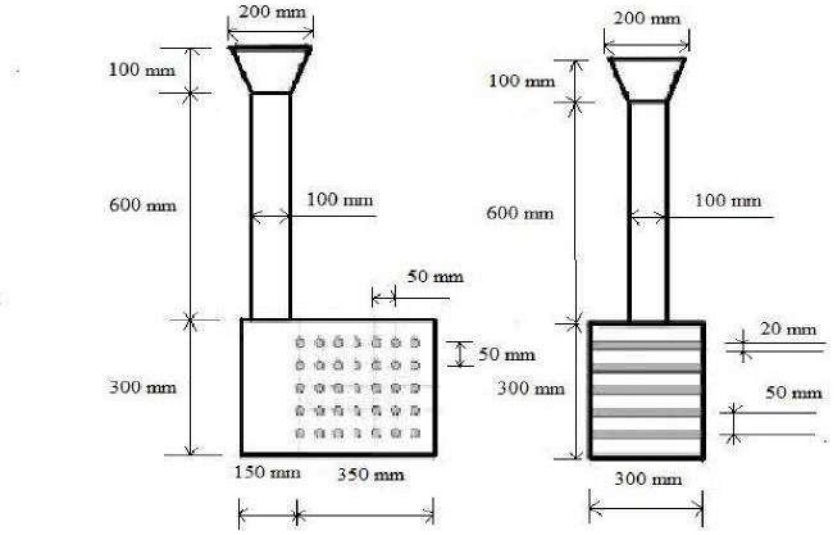


Figure 1.13: Caisson : vue frontale et vue latérale

Il s'agit de remplir à débit constant (remplir le tube en ajoutant chaque 5 secondes environ 1,5 litres de béton) le caisson jusqu'à ce que le béton commence à couvrir la ligne supérieure des obstacles, pour cela il faut environ 45 litres de béton. Une fois le béton stabilisé, mesurer la hauteur du béton du côté du tube (hauteur h1) ainsi que la hauteur du côté opposé (hauteur h2). Calculer ensuite le pourcentage de remplissage moyen R d'après la formule suivante **[54]** :

$$R(\%)= 100\%.(h_1.h_2)/2h_1 \qquad (1.3)$$

Si le béton coule aussi librement que l'eau, au repos on aura une surface horizontale (h1=h2) et donc R(%)=100%. Un béton peut être considéré comme autoplaçant si le rapport est supérieur à 90% **[54]**.

1.5.2. Capacité de passage

La capacité de passage décrit la capacité du mélange de béton frais à l'étalement à travers des espaces confinés sans ségrégation, sans perte d'uniformisation et sans

blocage. En définissant la capacité de passage, il est nécessaire de considérer, la géométrie et la densité du ferraillage, la capacité de remplissage du mélange ainsi que la dimension maximale du granulat.

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

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

Propriété	Essais à réaliser
Capacité de passage	• Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test) • Temps à T_{50} au cône d'Abrams en présence du J-Ring • Différence d'Hauteurs au J-Ring • Essai de la Boite en L (L-Box test) – Mesure de H2/H1 • Essai de la boite en U (U-Box test)

1.5.3. Résistance à la ségrégation

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

La résistance à la ségrégation devient un paramètre important dans le cas de classe élevée de fluidité ou de faible viscosité, ou bien dans le cas où les conditions de mise en place encouragent la ségrégation. Si aucun de ces cas ne se présente, il n'est généralement pas nécessaire de spécifier la classe de la résistance à la ségrégation. L'essai de la résistance à la ségrégation des BAP est l'essai au tamis de 5 mm. **[1]**

1.5.4. Rhéologie des BAP

1.5.4.1. Définition de la rhéologie

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

Comme certains matériaux ne répondent pas exactement à la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides, le vocable « rhéologie » a été inventé par des physiciens spécialistes de l'étude des matériaux dirigés par E.C. Bingham **[56]**. Entre le solide parfait et le liquide parfait newtonien, il est apparut nécessaire d'élaborer cette discipline nouvelle. L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis son apparition en 1928 **[57]** avec l'apparition de nouvelles substances au comportement complexe tel que : pâtes, boues, suspensions, émulsions, polymères, etc. Pour le cas du béton, on s'intéressera à l'étude de l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable.

Certaines substances qui peuvent s'écouler montrent toutefois une capacité à conserver une certaine forme sans que cette matière ne soit soutenue par un moule. Par exemple, du béton dans un cône d'affaissement aura exactement la forme du moule et lorsque le moule est soulevé, le béton adopte une nouvelle forme pour laquelle toutes les forces de cisaillement sont inférieures à la résistance en cisaillement du béton. C'est l'existence de ce seuil de cisaillement qui fait que le béton peut conserver cette forme malgré la force de gravité qui tend à niveler le béton complètement **[57]**. De tels corps montrant un seuil de cisaillement avant écoulement sont non Newtonien et dit plasto-visco-élastique. Un cas particulier de ce type de comportement est le cas du corps de Bingham (Figure 1.14) lequel présente une relation linéaire entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement après avoir franchis le seuil de cisail1ement **[57]**.

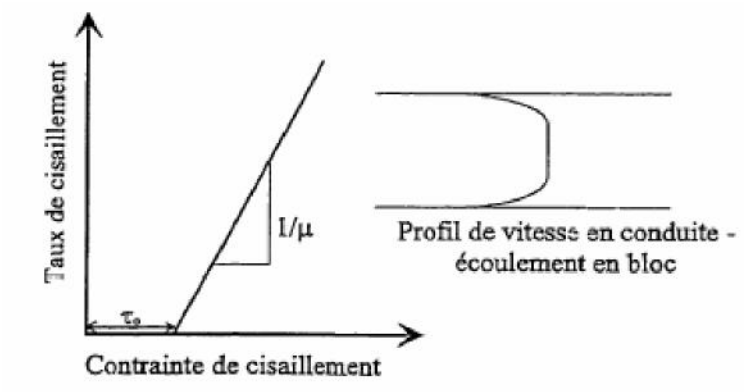


Figure 1.14 : Rhéogramme du corps de Bingham et profil de vitesse en conduite **[57]**

D'après Couarraze et Grossiord **[57]**, Bingham modifie de la façon suivante l'équation a base de Newton

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

Dans cette équation, les deux coefficients sont et caractérisent entièrement le comportement rhéologique du matériau. Le premier, τ0 est le seuil de cisaillement et le deuxième, μ est la viscosité plastique. Ceci implique que si une seule mesure couple-vitesse (ou contrainte de cisaillement et taux de cisaillement) est effectuée (Figure 1.13), le corps de Bingham ne peut être différencié de celui de Newton car une droite ne passant pas par l'origine doit nécessairement être définie par au moins deux points **[57]**.

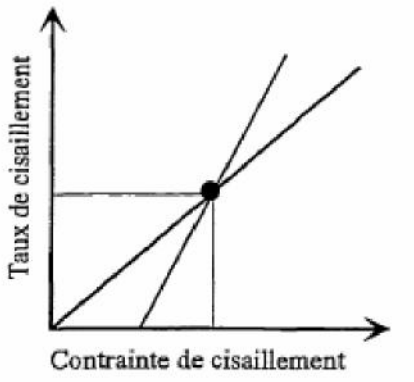


Figure 1.13 : Rhéogramme d'un fluide newtonnien et d'un binghamien **[57]**

Tous les fluides plastiques présentent un écoulement à noyau ou écoulement en bloc. En conduite, si la pression appliquée pour déplacer le corps n'est pas assez élevée pour vaincre le seuil de cisaillement pour toute la masse du corps, au centre, le corps se déplacera en bloc alors qu'en périphérie, le corps s'écoulera comme un

liquide. L'exemple le plus familier est celui de la pâte dentifrice qui sort en boudin lorsqu'on presse le tube. Le noyau est très important car la pression appliquée est faible.

1.5.4.2 Comportement rhéologique des BAP à l'état frais

Les propriétés déjà mentionnées sont obtenues grâce à une teneur très élevée en farines (≤ 0,125 mm) qui, ensemble avec l'eau et l'adjuvant fluidifiant, constituent le coulis de ciment, sous forme d'une suspension colloïdale à viscosité élevée, dans laquelle nagent les granulats plus grossiers sans aucune tendance à la ségrégation. A cet égard, il est en principe indifférent que les farines proviennent du ciment, de cendres volantes, de fumée de silice ou de fillers minéraux, dans la mesure où les interactions entre la suspension et le fluidifiant permettent d'atteindre les caractéristiques rhéologiques nécessaires.
En plus de la fluidité élevée généralement obtenue avec les bétons fluides, ce coulis (suspension) présente une certaine viscosité, c'est-à-dire un comportement analogue à celui du miel ou de certaines huiles minérales très visqueuses. C'est la combinaison de cette viscosité avec une fluidité très élevée qui confère au béton sa stabilité envers la ségrégation ainsi que sa capacité à se désaérer naturellement. Il est généralement admis que le comportement du béton frais est bien représenté par le modèle Binghamien après qu'un cisaillement ait été imposé pendant un certain temps **[56]**.

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

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment **[59]**. Shi et al. **[60]** montrent par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou une même valeur de seuil.

Lors de la fabrication du béton autoplaçant, on s'efforce par conséquent d'ajuster sa fluidité et sa viscosité de manière à permettre une mise en œuvre optimale. La viscosité du béton est généralement caractérisée par le temps d'écoulement nécessaire,

par exemple lors de l'essai d'entonnoir, ou le temps nécessaire à l'obtention d'un diamètre fixé lors de l'essai d'étalement. Le tableau 1.3 donne les différents essais permettant la détermination des paramètres rhéologiques des BAP.

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

Propriété	Essais à réaliser
Mesures Rhéologiques	• Affaissement au cône d'Abrams modifié • Temps d'Affaissement de 100 mm au cône d'Abrams modifié • Temps T_{40} de la Boîte en L (L-Box) • Temps T_{40} de la Boîte en L (L-Box) • Evaluation du Seuil de Cisaillement • Evaluation de la Viscosité Plastique • Essai au Rhéomètre IBB • Essai de deux-Points de Tattersal • Essai à l'appareillage de Bertta • Essai au rhéomètre de BTRHEOM

a/ Essai au Rhéomètre IBB

La première méthode utilisée pour l'étude de la thixotropie d'un mélange est effectuée grâce à l'utilisation d'un rhéomètre IBB (Figure 1.15).



Figure 1.15 : Rhéomètre IBB **[29]**

Le protocole d'essai consiste à maintenir un mobile dans un mouvement de rotation à une vitesse constante. On peut alors en déduire le torque, c'est-à-dire le couple appliqué pour le cisaillement. Le couple maximal correspond à la mesure initiale. Ceci est dû notamment au phénomène de floculation du ciment, qui fait qu'il est nécessaire d'appliquer une force plus importante lorsque l'on débute le cisaillement. Le couple exercé a tendance à diminuer car l'échantillon de béton exerce une résistance moins

importante sur le mobile. On fait varier la vitesse de rotation à 0.3, 0.5, 0.7 et 0.9 tour/seconde. Chaque vitesse est maintenue sur une durée de 25 secondes, après un temps de repos de 4 minutes.

La seconde phase de l'essai consiste à relier la thixotropie avec le développement de la pression latérale des coffrages. La méthode d'essai consiste à remplir avec le mélange étudié un tube en PVC rigide de 200 mm de diamètre et de 2100 mm de hauteur. On mesure alors les pressions latérales exercées sur le tube grâce à la mise en place de capteurs de pression, préalablement étalonnés. Les capteurs sont placés le long du tube à une distance de 50, 250, 450, 850 et 1250 mm à partir du bas du tube.

b/ Essai de deux-points de Tattersal

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

c/ Essai à l'appareillage de Bertta

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

d/ Essai au rhéomètre de BTRHEOM

Le rhéomètre, BTRHEOM, a été développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), par De Larrard. Il se compose d'un seau avec un fond dentelé, et d'une roue supérieure tournante se reposant sur le béton (Figure 1.16). La distribution d'effort de cisaillement permet le calcul direct de l'effort de viscosité et de fléchissement selon des équations fondées sur l'hypothèse que le béton est un fluide de Bingham. Si cette prétention n'est pas correcte, un autre ensemble d'équations devra être établi en utilisant le rapport correct entre le taux de cisaillement et l'effort de cisaillement.

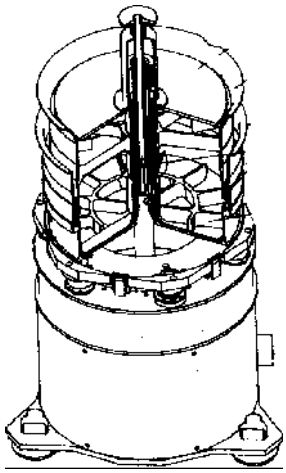


Figure 1.16 : Rhéomètre BTRHEOM. **[29]**

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

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

a/ Type de ciment

L'influence du ciment sur l'ouvrabilité dépend de sa composition minéralogique, de sa finesse de mouture et des adjuvants avec lesquels il est utilisé simultanément. Le

type de ciment affecte surtout la rhéologie initiale du mélange de béton. La composition du ciment, par exemple la teneur en C3A qui réagit très rapidement, va déterminer la rhéologie du mélange. Beaupré et Mindess **[61]** ont effectués des essais avec trois types de ciment. Quand tous les autres paramètres sont constants, un mélange fabriqué avec du ciment type 50 (classe 52,5 norme européenne) montre le plus faible seuil de cisaillement, un mélange fait avec du ciment type 30 (classe 32,5 norme européenne) avec fumée de silice montre le plus grand seuil de cisaillement et un mélange fait avec du ciment type 30 présente un seuil de cisaillement entre les deux précédents. La viscosité plastique demeure constante en général **[61]**.

b/ Dosage en eau

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

Très récemment Hwang et Khayat **[62]** ont trouvé qu'une composition de BAP a une considérable influence sur l'apparition des fissures. Ainsi une composition à E/C = 0,42 prend 26 à 37% plus de temps avant l'apparition des fissures qu'une composition à E/C = 0,35 en utilisant le même superplastifiant. Par contre la première composition montre un plus grand retrait plastique que la deuxième, d'après les auteurs ceci est dû au fait que la composition à E/C = 0,42 a un plus grand volume de pâte et moins de gros granulats (en volume).

c/ Excédent de pâte de ciment

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

d/ Quantité de fines (<80tm)

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

L'ajout de fumée de silice augmente le seuil de cisaillement à partir d'une teneur de 7%. A un dosage inférieur à 7% en fumée de silice, un effet négligeable a été observé **[61]**. Aussi, si la teneur en ciment est faible, l'augmentation du seuil de cisaillement se fait moins sentir. Le comportement des bétons renforcés de fibres est Binghamien, lorsque la quantité de fibres augmente, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement augmentent aussi. Lorsque la longueur des fibres augmente, seul le seuil de cisaillement augmente.

e/ Choix et dosage des Adjuvants

Les superplastifiants sont généralement utilisés pour des bétons à faible rapport E/C. Généralement, on observe une diminution du seuil de cisaillement avec 1'augmentation de la concentration en superplastifiant alors que la viscosité plastique ne change pratiquement pas **[63]**. Un autre effet des superplastifiants est la perte rapide de l'affaissement dans le temps. Un béton non superplastifié sera relativement stable dans le temps quant à ses propriétés rhéologiques alors qu'un béton superplastifié peut montrer une prise beaucoup plus rapide ou une prise anormalement retardée à de très hautes concentrations en superplastifiant **[56]**.

L'efficacité d'un adjuvant peut être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés (compatibilité). De plus, un dosage élevé en adjuvant retarde généralement le début de prise. L'utilisation d'un adjuvant stabilisateur permet de réduire le risque de ségrégation du BAP (ressuage, granulats grossiers coulant vers le bas), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C. Dans chaque cas, il convient donc de sélectionner les adjuvants les mieux appropriés à un ciment donné au moyen d'essais préliminaires. Sinon, il faut s'attendre à devoir recourir à des dosages élevés en adjuvants, voire à l'apparition d'un raidissement prononcé avec perte des performances recherchées du BAP **[19]**.

g/ Agents entraîneurs d'air

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

h/ Granulats

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zones confinées, il faut en limiter le volume. D'un autre côté la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées.

En général ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP. Bien évidemment ce rapport peut être revu à la hausse si le confinement est faible, ou à la baisse dans le cas contraire. Comme mentionné précédemment, le diamètre maximal D_{max} des gravillons doit rester en dessous de 20 mm pour minimiser le risque de blocage.

D'autre part le sable est un facteur important pour la fabrication du BAP vu qu'il a une influence déterminante sur ses propriétés à l'état frais. Si la proportion de sable augmente par rapport au gravier, la demande en eau et le rapport E/C augmentent, tandis que la viscosité diminue. Et inversement en cas de diminution de la proportion de sable. Le sable présente une demande en eau réduite lorsque sa teneur en fines est faible **[19]**.

i/ Temps

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

j/ Température

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

1.6. La formulation des bétons autoplaçants

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.

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'affaissement 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.

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

Il existe une très grande variété de matériaux dans le monde, et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant ; chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation. La variété de matériaux peut conduire aussi à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, résistance).

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.

L'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation; les dosages en superplastifiant 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 du formulateur.

- 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/m^3.
- La masse de ciment est en général de 300 à 350 kg/m^3. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m^3.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage de saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développé 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.

De multiples approches ont été développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant, ces diverses méthodes de formulation ont en commun des principes et des conditions qui sont **[64]** :

1. Augmenter la déformabilité de pâte :
    - En utilisant un superplastifiant (agent fortement réducteur d'eau) ;
    - En équilibrant la teneur en eau et en poudre.
2. Réduire les frictions entre les granulats :
    - En limitant le volume des gros agrégats (et en augmentant le volume de pâte) ;

- En utilisant une granulométrie de poudre continue.

3. Réduire la séparation des solides :
   - En limitant le volume d'agrégats ;
   - En diminuant la taille maximale des granulats ;
   - En utilisant un agent de viscosité.
4. Minimiser le ressuage (eau libre) :
   - En réduisant la quantité d'eau ;
   - En diminuant le rapport eau/poudre ;
   - En utilisant des poudres possédant une bonne surface spécifique ;
   - En augmentant la teneur en agent de viscosité.
5. Améliorer la cohésion pour réduire la ségrégation durant l'écoulement :
   - En diminuant le rapport eau/poudre ;
   - En utilisant un agent de cohésion.
6. Espacer les barres en fonction du volume et de la taille maximale des agrégats :
   - En diminuant le volume de gros agrégats ;
   - En réduisant la taille maximale des granulats ;
   - En utilisant des agrégats de forme ronde.

1.6.1. Formulation par la méthode générale

Cette formulation proposée en 1993 par l'équipe du professeur OKAMURA émane de l'idée selon laquelle seul un ciment portland à faible chaleur d'hydratation ou un ciment portland riche en bélite est susceptible de générer des matériaux poudreux. Fort de ce principe, on peut donc s'attendre, une fois l'autocompactibilité obtenue, à ce que le béton durci atteigne lui aussi les performances recherchées.

Pour tenir compte des variations qui peuvent se produire dans le processus de fabrication (quantité des matières, erreurs de pesages, etc.), on fixe au préalable une exigence d'autocompactibilité légèrement plus sévère que la valeur théoriquement nécessaire. La formulation comporte en fait cinq étapes **[64]**:

La quantité d'air (A) est choisie en fonction de la résistance au gel-dégel. Avec G_{lim}, qui est le volume absolu d'un m^3 de gros agrégats, le volume de gros agrégats (G) est évalué selon la formule

$$G=\frac{50}{100}G_{\text{lim}}(1-A). \qquad (1.\ 4)$$

Le volume de fins agrégats (S) représente 40% du volume de mortier, soit :

$$S=\frac{40}{100}\frac{(1-A-G)}{1-K_{sf}} \qquad (1.\ 5)$$

où K_{sf} représente le taux de fines particules (<0.09mm) dans le sable.

Le rapport volumique Eau/Poudres est déterminé par deux tests sur mortier. Le premier est un test d'écoulement avec un petit cône, le second est une mesure du temps de passage à travers un entonnoir.

La fluidité du mortier est donnée par :

$$D=\frac{d^2-d_0^2}{d_0^2} \qquad (1.\ 6)$$

où d est le diamètre de la galette et d_0 la base du cône.

La viscosité du mortier est donnée par :

$$T=\frac{10}{t} \qquad (1.\ 7)$$

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

L'obtention simultanée d'un paramètre d'écoulement de 5 et d'un paramètre de temps de passage de 1 conditionne la formulation Okamura.

Le dosage en superplastifiant est évalué par rapport à la masse de poudre et à la teneur en eau, à l'aide des tests sur mortier. Cependant, le dosage pour le béton devra être ajusté (énergie de malaxage différente, etc.) en fonction de tests spécifiques. De manière semblable aux deux tests appliqués sur le mortier, l'essai d'étalement et l'essai d'entonnoir, adaptés au béton évaluent ses aptitudes à la déformation. L'étalement doit se situer entre 65 et 85 cm, et le temps de passage doit être compris entre 10 et 15 secondes **[64]**.

Ces tests sur béton permettent de dissocier l'action d'un ajout d'eau de celle d'un ajout de superplastifiant. L'eau abaisse considérablement la cohésion du mélange et diminue le temps d'écoulement dans l'entonnoir, sans améliorer sensiblement l'étalement. Le superplastifiant diminue légèrement le temps d'écoulement en entonnoir et améliore nettement l'étalement.

1.6.2. La formulation JSCE :

La démarche proposée en 1998 par la *Japanese Society of Civil Engineers* (JSCE) est fondée sur des travaux de recherche et des applications pratiques. Dans cette formulation, la quantité d'eau, le rapport eau/poudres et la teneur en poudre varient en fonction de l'utilisation ou non d'un agent de cohésion. Les points principaux de cette formulation sont présentés ci-après **[64]** :

- Le volume absolu des gros agrégats varie en fonction de l'autocompactibilité désirée. Il est situé entre 0.30et 0.32 m^3/m^3 et le diamètre maximum est limité à 20, voire 25mm.
- Quand un agent de viscosité est utilisé, la quantité d'eau se situe idéalement sous les 180 kg/m^3 dans les conditions d'exposition normales. Si la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, et uniquement dans ce cas, il peut être utilisé jusqu'à 190 kg d'eau par m^3. en absence d'agents de viscosité, la quantité d'eau doit être située entre 155 et 175 kg/m^3.
- Les rapports eau/poudres et eau/liant sont basés sur les performances du béton à l'état durci. Si la fluidité n'est pas atteinte, on peut utiliser davantage de liant. Sans agent de viscosité, le rapport eau/poudres se situe entre 28 et 37% en masse et entre 85 et 115% en volume.
- Les quantités de liant et de poudres sont déduites des rapports précédents. Avec un agent de viscosité de type polysaccharide, les poudres représentent en général0.13m^3/m^3. dans les autres cas, une valeur standard devra être déterminée entre 0.16 et 0.19 m^3/m^3.
- La quantité d'air dépend du diamètre maximum du gros granulat, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4.5% d'air.
- La quantité de fins agrégats se déduit des quantités précédentes (gros agrégats, poudres, eau et air).

- Le dosage de superplastifiant et d'agent de viscosité est évalué selon l'expérience. Le dosage de superplastifiant dépend cependant du rapport eau/poudres et de la nature des poudres. Il est généralement situé, pour les superplastifiants de nouvelle génération, entre 1 et 2 kg d'extrait par m^3, ce qui correspond, pour une solution aqueuse à 35%, à une quantité de 3 à 6 litres. Le dosage en agent de viscosité est très variable selon la nature de l'agent et le type de béton (avec ou sans ajout de fines) : de 0.15 à 0.30% de la quantité d'eau pour les agents cellulosiques, de 3 à 5% pour les acryliques, de 2 à 3% pour les glycols, de l'ordre de 0.05% pour les polysaccharides solubles.

1.6.3. Formulation par minimisation du volume de pâte (CBI Méthode ou Méthode Suédoise)

Le béton est considéré ici comme un mélange diphasique, avec une phase solide (granulats) et une phase liquide (pâte = eau + liant + adjuvants). Les auteurs supposent que la phase liquide joue deux rôles dans un BAP. D'abord, elle fluidifie le matériau en limitant les frottements entre les granulats. Elle écarte ensuite suffisamment les gravillons pour éviter la formation de voûtes contre les armatures, responsable d'un éventuel blocage de l'écoulement les auteurs font de plus l'hypothèse qu'il existe un volume minimum de pâte permettant de remplir chacune de ces deux fonctions. Ils proposent les deux critères suivants **[65]:**

a. Critère de fluidité

Le volume minimum de pâte nécessaire pour fluidifier $1m^3$ de béton s'écrit :

$$V_{f\min} = 1 - \frac{(1 - V_{vide})}{C_e} \qquad (1.8)$$

où V_{vide} est la porosité (m^3/m^3) du mélange de sable et de gravillon.

C_e est un coefficient « d'écartement ». Lorsqu'il vaut 1, $V_{f\ min}$ est égal à V_{vide} : le volume de pâte remplit la porosité des granulats. Lorsque C_e est supérieur à 1, la pâte comble la porosité et écarte les granulats. Ce coefficient est calculé comme suit :

$$C_e = \left(\frac{e_{\min}}{D_{moyen}} + 1 \right)^3 \qquad (1.9)$$

Et $$D_{moyen}=\frac{\sum(m_i \times d_i)}{\sum m_i} \qquad (1.10)$$

où D_{moyen} est le diamètre moyen des granulats (mm) ; d_i est le diamètre du tamis i (mm) ; m_i est la masse de granulats sur le tamis i (kg) ; e_{min} est la distance moyenne minimale entre les granulats pour fluidifier le béton (mm).

La détermination de e_{min} se fait de manière expérimentale. Des bétons avec des volumes de pâte décroissants sont confectionnés ; on considère que le volume limite de fluidité est atteint lorsque l'étalement du béton est inférieur à 65 cm ou lorsqu'il y a ségrégation. Au final, on obtient des courbes donnant la distance e_{min} en fonction de D_{moyen} pour différents rapports massiques eau/fines (E(C+F)) et pour différents diamètres maximaux du gravillon. On notera que les auteurs n'ont choisi que trois paramètres pour décrire e_{min} (E(C+F), D_{moyen}, D_{max}) au détriment, par exemple, du dosage en superplastifiant. Ils expliquent ce choix par un souci de simplicité du modèle.

b. Critère de non-blocage

Les auteurs ont proposé une approche d'évaluation du risque de blocage du béton en utilisant l'essai de la boîte en L. Ils ont fait l'hypothèse que le phénomène de blocage était indépendant de la nature de la pâte pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide.

L'expression du risque de blocage R_b s'écrit :

$$R_b=(1-V_p)\sum_i \frac{V_i}{V_{crit,i}} \qquad (1.\ 11)$$

V_i : proportion volumique de grains de taille *di* rapportée au volume de granulat ;

Vp: proportion volumique de la pâte dans le béton ;

$V_{crit,i}$: fraction en volume en grain de taille i induisant un blocage.

De cette relation on peut déduire pour chaque rapport gravillon sur sable la teneur en pâte minimale pour éviter le blocage en écrivant R_b=1 (en fait, le risque de blocage a lieu si R_b est inférieur ou égal à 1).

Le choix du G/S pourrait se faire de manière arbitraire en posant par exemple G/S=1. Du point de vue économique, il serait préférable de prendre un rapport G/S le plus faible possible pour limiter la quantité de liant. On sait cependant qu'un béton

fortement dosé en sable entraîne plus d'air, d'où la préférence de choisir un mélange sable gravillon avec porosité minimale.

1.6.4. Méthode française (LCPC)

Au LCPC (laboratoire central des ponts et chaussée), un modèle mathématique a été développé par De Larrard et al en 1994, 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 **[66]** :

- 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 superplastifiant 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 superplastifiant) est déterminé
- Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi).

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

1.7. Conclusions

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives à la durabilité des BAP, bétons de fabrication récente, par rapport à celle des bétons traditionnels, que l'on peut considérer être connue.

Les BAP se développent maintenant en Algérie et semblent être amenés remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Il présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : absence de nuisances sonores en milieu urbain, possibilité de bétonner des zones fortement ferraillées ou à géométrie complexe et l'obtention d'une meilleure qualité du béton (pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers) d'une part, diminution du temps de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels, d'autre part.

Nous avons pu remarquer que dans littérature il existe un nombre important de méthodes permettant de définir la composition d'un BAP. Il est montré aussi que le nombre d'essais pour la caractérisation de la fluidité, de la capacité de remplissage et la ségrégabilité est presque égal au nombre d'équipes de recherche qui existent dans le monde. Chaque laboratoire a pu concevoir son propre montage.

De plus, les possibilités de variation des paramètres d'étude pour de tels bétons sont nombreuses (utilisation de différentes additions minérales, d'agent de viscosité, de superplastifiant, variation du volume de pâte, du rapport G/S, du rapport E/C, etc.). Tout ceci engendre une vision au cas par cas de chaque propriété étudiée et ne permet pas de généraliser les observations effectuées à une gamme de l'ouvrabilité et la résistance mécanique étendue. La nécessité d'études globales sur le thème de l'effet de la nature et la dimension des granulats sur l'ouvrabilité et la résistance mécanique des BAP.

CHAPITRE 2 :

Les Granulats

2.1. Introduction

Les granulats (sable et gravier) constituent le squelette du béton. Ils sont définis comme un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 125 mm **[67]** et doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. La nature des roches constituant les gisements est responsable des propriétés intrinsèques (masse volumique, résistance, porosité, réactivité, etc.) des granulats **[67]**. La granularité et la forme des granulats sont fonction du processus d'élaboration. Selon leur origine, on distingue
Les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière.

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

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, toutefois, comme pour un béton ordinaire, la forme des granulats a une influence sur le comportement rhéologique. Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés.

2.2. Définition d'un granulat

Les granulats, ou agrégats, sont définis comme étant un ensemble de grains chimiquement inerte de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, qui mélanges à la pate de ciment, constituant le squelette des bétons. Le terme granulat est étendu à des granulats artificielles ou non, utiliser dans la construction : laitier granulé (sous produit de la sidérurgie), mâchefer déchets de briques, matériaux expansés, vermiculite, perlite, liège, des granulats très durs (quartz, corindon, carborundum, etc.) ou très denses (barytine, magnétite).

On appelle granulat un ensemble de grains minéraux' de dimensions comprises entre 0 et 125 mm' de provenance naturelle ou artificielle' destinés à la confection :

- des mortiers' des bétons'

- des couches de fondation' des couches de base et de roulement des chaussées'
- et des assises et des ballasts de voies ferrées.

Ils sont appelés fillers1' sablons' sables' gravillons' graves ou ballast suivant leurs dimensions.

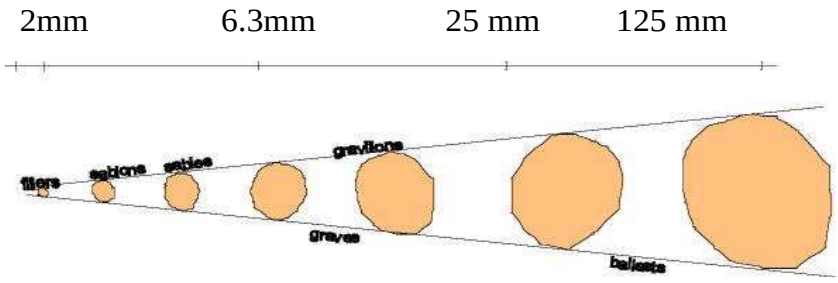


Figure 2.1 : les diamètres des granulats

Les granulats sont le constituant de base de tous travaux de Génie Civil. Il est donc important de maîtriser l'ensemble de leurs propriétés (et influences); tant du point de vue de leurs élaborations' que de leurs utilisations (mise en œuvre); et ce' afin de maîtriser au mieux le coût tout en respectant des critères de qualité.

2.3. Classifications normalisés des granulats

2.3.1. Classification selon la provenance

Il est d'usage de classer les granulats selon plusieurs paramètres provenance, étendue granulaire et densité. On distingue :
Les granulats roulés.

Ce sont en général des matériaux naturels alluvionnaires, utilisés directement sans aucun traitement mécanique. Ce sont notamment :

- Les sables, graviers et cailloux issus des rivières;
- Les sables, et graviers issus des carrières ;
- Le sable de mère.
- Le sable éolien des dunes.

Ces granulats sont particulièrement caractérisés par des grains des formes arrondis et un état de surface très lisse.

2.3.2. Granulats naturels d'origine industrielle

Ils proviennent du concassage de roches dures telles que le granit, la Quartzite, le Porphyre, le Basalte, et Calcaire Oolithique dur, ces granulats sont caractérisés par un aspect géométrique anguleux, des arêtes vives et un état de surface rugueux.

2.3.3. Les granulats lourds

Ils sont essentiellement utilisés dans la confection du béton lourd, matériaux utilisés dans construction d'ouvrages nécessitant une protection biologique contre les rayonnements produits dans les accélératrices et autres piles atomiques. Ces granulats se caractérisent essentiellement par une densité très élevée. En pratique on utilise les granulats suivants :

Tableau 2.1 : Densité des granulats lourds

Nature du granulat	Caractéristiques	Densité
Barytine	Il s'agit d'un sulfate de baryum.	(4.2 4.7)
Magnétite	Il s'agit d'un oxyde de fer.	(4.5 5.1)
Riblons	Il s'agit de déchets de ferraille.	(7.6 7.8)
Grenaille de fer	Il s'agit de la fonte.	(7.6 7.8)

2.3.4. Les granulats légers

Ce sont des granulats utilisés dans la confection de béton léger. Ils seront développés un peu plus loin.

Tableau 2.2 : type de granulats légers

	ELABORATION	ORIGINE	MATIERES PREMIERES	PRODUITS FINIS
Matières premières naturelles	Sans traitement thermique	Volcanique	Ponces Pouzzolanes Tufs volcaniques Cinérites	Ponces Pouzzolanes Tufs volcaniques Cinérites
		Sédimentaire	Calcaire poreux Calcaire coquillier Tufs calcaires Dialomites Spongolites	Diatomite Diatomite Calcinée
	Avec traitement thermique	Volcanique	Perlites	Perlite expansée
		Altération	Vermiculites	Vermiculite exfoliée
		Sédimentaire	Argiles Schistes Ardoises	Argile expansée schistes expansée Ardoise expansée Gravillons
Matières premières	Sans traitement thermique	Démolition	Décombres, cendres de foyers	Décombres, mâchefers
	Avec traitement thermique	Sous-produit industriels	Cendres volantes Laitiers Calcine	Mâchefers frittés Cendres volantes Laitier expansé Verre expansé

2.3.5. Les granulats réfractaires

Ce sont des granulats qui permettent d'obtenir des bétons résistants aux températures très élevées (jusqu'à 1000°C). Ce sont essentiellement le laitier de haut fourneau, la Pouzzolane, le Porphyre, et le Ballast, Au-delà des produits obtenus par cuisson de l'argile à une température très supérieure à celle d'utilisation, ceci afin d'éviter les variations dimensionnelles.

2.3.6. Les granulats recyclés

Ce sont des granulats qui proviennent de la démolition d'ouvrages dégradés ou anciens.

2.4. Caractérisation et propriétés des granulats pour béton

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage. Les granulats constituent le squelette du béton et ils représentent, dans les cas usuels, environ 80% du poids total du béton.

Les granulats sont nécessaires pour la fabrication des bétons; du point de vue économique, car ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est plus cher, du point de vue technique, car ils augmentent la stabilité dimensionnelle (retrait, fluage) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment. Il faut par conséquent, augmenter au maximum la quantité de granulats, en respectant toutefois les deux conditions suivantes:

- Les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité ;
- La qualité de pâte liante doit être suffisante pour lier tous les grains et remplir les vides.

2.4.1. Caractéristiques physiques

2.4.1.1. La masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains. La densité absolue est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse du même volume d'eau distillée à la même température **[68]**.

2.4.1.2. La masse volumique réelle

La masse volumique réelle d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau déduction faite des vides entre particules. La déduction ne concerne pas les vides compris dans le matériau mais seulement ceux entre les particules. La densité réelle est le rapport de la masse réelle d'une unité de volume du matériau sec dans l'air à température donnée à la masse d'un égal volume d'eau distillée à la même température **[68]**.

2.4.1.3. La masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas. Comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté. La densité apparente à l'état compacté ou non compacté sera obtenue en établissant le rapport de la masse apparente d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse d'une même quantité d'eau distillée à même température.

La masse volumique apparente d'un granulat dépend de la forme et de la granulométrie des grains ainsi que le degré de compactage et d'humidité. La valeur apparente est utilisée dans le cas ou l'on effectue les dosages en volume des différentes composantes du béton **[68]**.

2.4.1.4. Absorption

La plupart dos granulats stockés dans une atmosphère sèche pendant un certain temps, peuvent par la suite absorber de l'eau. Le processus par lequel le liquide pénètre dans la roche et l'augmentation de poids qui en résulte sont appelés absorption. L'absorption peut varier dans de très larges mesures suivant la nature du granulat. Elle peut varier de 0 à plus de 30 % du poids sec pour granulat léger.

En général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pratiquement pas d'eau lorsqu'ils sont gâché. Avec le ciment et l'eau Par contre, des granulats artificiels, tels le LECA (Light expanded clay aggregate= agrégats légers expansés d'argile), sont poreux. Il faut alors tenir compte de l'absorption de l'eau par les granulats lorsque l'on détermine la quantité d'eau requise pour fabriquer le béton.

Lorsque les granulats sont légèrement poreux, il faut travailler, lors de l'étude de la composition d'un béton, avec des matériaux saturés à surface sèche. On obtient cet état en conservation les granulats dans l'eau pendant plusieurs heures et en les laissant sécher juste avant emploi jusqu'à ce que leur surface devienne roulante **[68]**.

2.4.1.5. Porosité et compacité

- **Porosité**

En général la porosité est le rapport du volume des vides au volume total.

p=volume des vides / volume totale (2.1)

On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent

- **Compacité**

La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total.

Ou volume des pleins par unité de volume apparent.

c =plein/ (vide + plein) (2.2)

p = vide / (vide + plein) (2.3)

La porosité et la compacité sont souvent liées par la relation :

p+c=1 (2.4)

La porosité et la compacité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100%.

Si l'on connaît la masse volumique D et la masse spécifique g d'un matériau, il est aisé de calculer sa compacité et porosité.

c volumes des pleins/volume totale

Donc:

c = volume des pleins / volume totale (2.5)

$$\begin{cases} c\,(\%) = \frac{100\Delta}{\gamma} & (2.6) \\ p(\%) = 100\left(1 - \frac{\Delta}{\gamma}\right) & (2.7) \end{cases}$$

Δ: volume des pleins

γ : volume totale

2.4.1.6. Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids de même matériau sec. On peu aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec **[68]**.

W = E / Ps = Ph-Ps / Ps (2.8)

E : poids d'eau dans le matériau

Ps : poids du matériau sec

Ph : poids du matériau humide

A partir des définitions données plus haut, on peut écrire les relations :

E= (W% / 100).Ps (2.9)

E= (W %/ 100 + W %). Ph (2.10)

II faut disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats.

2.4.1.7. Propriété et forme des granulats

2.4.1.7.1. Propriété des granulats

La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée. **[68]**.

Il faut souligner la qualité de béton. La présence de particules argileuses est en effet défavorable, autant a la mise en œuvre du béton qu'à ses Performances finales, en abaissant l'adhérence de la pâte de ciment sur les granulats, D'autres impuretés telles que les particules organique; sont susceptibles de nuire aux qualités du béton et perturber son durcissement. Les sels tels que les sulfates ou les sulfures, peuvent être à l' origine de phénomènes de gonflement ou de tâches. Les corps étrangers (Lignites ou scories) sont à proscrire.

Dans le cas de gravillons, elle est donnée par le pourcentage de passant au tamis de 0,5 mm (tamisage effectué sous eau).

Dans le cas des sables, la propreté (SE) est fournie par l'essai appelé « équivalent de sable » qui permet de mesurer la fraction argileuse du matériau.

L'essai consiste à séparer le sable des matières argileuses ou fines, qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette ou l'on a effectué le lavage (plus la valeur de SE et grande, plus le sable est propre). Elle peut également être évaluée par l'essai au bleu méthylène (VB)-plus la valeur de VB est petite, plus les sables sont propres. Le bleu de méthylène est adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer. La valeur de bleu (VB) exprime la quantité de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines.

2.4.1.7.2. Formes des granulats

Selon la forme les granulats peuvent être :

-***Granulats roulés*** : ils ont plus faciles à mettre en place et ne nécessitent pas de moyens de serrage importants, ils glissent bien entre les armatures.
-***Granulats concassés*** : Ils donnent lieu à des bétons raides à mise en place difficile.par contre ils adhèrent bien à la pâte de ciment et procurent au béton une plus grande résistance notamment à la traction.

2.5. Caractéristiques mécaniques et méthodes des mesures

2.5.1. Résistance à l'usure des gravillons

La résistance à l'usure des granulats est déterminée par l'essai Micro-Devale en présence d'eau. Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en cotation des phénomènes d'usure par frottements. Cette résistance est caractériser par le coefficient Micro-Deval MDE qui représente la d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient MDE est faible plus la résistance à l'usure des gravillons est élevée.

2.5.2. Résistance à la fragmentation des gravillons

La résistance la fragmentation est déterminée par le coefficient los Angeles. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques.

Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments finis produits au cours de l'essai. Plus le coefficient LA est faible, plus la résistance des gravillons est élevé.

2.5.3. Propriétés chimique et durabilité des granulats

Certains constituants des granulats pourraient affecter défavorablement la durabilité du béton et en particulier des bétons armés sensible à la présence de chlorure.
La mesure de la teneur en chlore est réalisée selon la norme NBN B 11 -202. Il y a lieu dévaluer la susceptibilité a des réactions, en particulier entre des silices amorphes de certains granulats et des alcalins d'origines diverses. Il s'agit des réactions alcalis-silices qui sont la source de dégradations importantes des bétons.

Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre total S n'excède pas 0,4 % en masse. La teneur en

sulfates (S03) doit être inférieure à 0,2 %. On la détermine si S est supérieure à 0,08 %. **[69]**

Dans des conditions défavorables (granulats contenant une fraction significative de silice soluble réactive dans un environnement riche en alcalin) et en présence d'humidité, les phénomènes d'alcali réaction peuvent provoquer un gonflement du béton. Les granulats sont désignés comme étant non réactifs (NR), potentiellement réactifs (PR, ou potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP)).

2.5.4. Essais sur granulats

2.5.4.1. Essai d'équivalent de sable : (NF P 18-598)

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution floculante ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H_1) et du sédiment + floculant (H_2). L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$ES = \frac{H_1}{H_2} \times 100 \qquad (2.11)$$

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

2.5.4.2. Module de finesse : (NF P 18-304)

Le module de finesse d'un sable est définit par le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5.

2.5.4.3. Masse volumique

Il s'agit de mesurer le volume absolu, en vrac, et apparent du sable et de chaque fraction granulaire pour déterminer le squelette granulaire du béton.

2.5.4.4. Taux d'absorption des granulats

Après déshydratation des échantillons à 105°C, on les pose dans un bac d'eau jusqu'à la saturation, et on mesure ensuite le taux d'absorption des granulats par la formule suivante :

$$AG(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \qquad (2.12)$$

Avec :

M_1 : Poids de l'échantillon déshydraté ;

M_2 : Poids de l'échantillon après saturation.

2.5.4.5. Essai Los Angeles : (NF P 18-573)

Cet essai consiste à mesurer la résistance des granulats à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements. Il se pratique sur les classes granulaires 4/6.3 ou 6.3/10 ou 10/16.

On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 11 boulets de 417 g dans un tambour ; après un nombre normalisé de tour du tambour, on récupère le passant P au tamis de 1.6 mm.

Le coefficient Los Angeles est calculé par la formule suivante :

$$LA = \frac{P \times 100}{5000} \qquad (2.13)$$

Les granulats sont qualifiés comme suit :

- LA < 15 ……...très bon ;
- 15 ≤ LA < 20 ……...bon à moyen ;
- 20 ≤ LA < 30 ……...moyen à faible ;
- LA ≥ 30 ……...médiocre.

2.6.Conclusion

Les granulats représentent ; en poids et en volume ; la part la plus importante des bétons autoplaçant. De part ce fait, c'est assez largement à eux qu'il incombe d'Assur de performances mécaniques de ce matériaux de construction, sont perde de vue le rôle essentielle des liens qu'est de les maintenir en place en montre que les caractéristiques des granulats dépanadent de la nature et de la qualité des matériaux d'origine d'un part, et de leur condition d'exploitation d'autre part.

CHAPITRE 3 :

Matériaux et Méthodes

3.1. Introduction

Ce chapitre présente d'abord les principales caractéristiques des matériaux susceptibles d'entrer dans la composition d'un béton autoplaçant {ciment (C), granulats (G), superplastifiant(SP), et eau (E)}, et qui mélangés, constituent ce qu'on appelle la pâte de ciment. Nous exposons ensuite les différentes méthodes mises en œuvre pour la caractérisation des propriétés d'écoulement des pâtes de ciment. Ainsi, nous détaillons les différents outils utilisés, les procédures, les conditions et les échéances expérimentales.

3.2. Matériaux

3.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est un CEM I 42.5 : un ciment Portland ordinaire dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, sa masse spécifique est de 3.15 g/cm^3 et sa surface spécifique de Blaine (SSB) est de 3000 cm^2/g. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le tableau 3.1

Tableau 3.1 : Caractéristiques physico-chimiques du ciment CEM I 42.5

Composition chimique (%)									
CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	PAF	RI
65.70	21.70	5.20	2.70	0.70	0.60	0.70	0.40	1.3	0.3
Composition minéralogique (%)									
C_3S		**C_2S**		**C_3A**		**C_4AF**			
59.2		14.1		6.1		11.4			

3.2.2. Granulats

3.2.2.1. Sable

Pour que le module de finesse du sable utilisé soit environ 2,50 ; on a combiné deux types de sable: fin de HassiBahbah (63%) et grossier de Mont Guorno (37%) dont les propriétés physiques d'identification sont présentées au tableau 3.2.



Figure. 3.1 : Sable fin de HassiBahbah.



Figure. 3.2 : Sable grossier de Mont Guorno.

Tableau 3.2 : Propriétés physiques d'identification des sables utilisés.

Caractéristiques	**Type de sable**		**Normes**
	Roulé	**Concassé**	
Provenance	**HassiBahbah**	**Mont Guorno**	
Classe granulaire	0/3	0/5	NF EN 933-1 **[69]**
Module de finesse	1,01	3,37	
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,58	2,59	NF EN 1097-6 **[70]**
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,42	1,48	NF EN 1097-3 **[71]**
Equivalent de sable (%)	61,13	41,31	NF EN 933-8 **[72]**
Taux d'absorption d'eau (%)	0,01	0,02	NF EN 1097-6 **[70]**

L'analyse granulométrique des deux sables utilisés et leur mélange est présenté sur la figure 3.3 suivante :

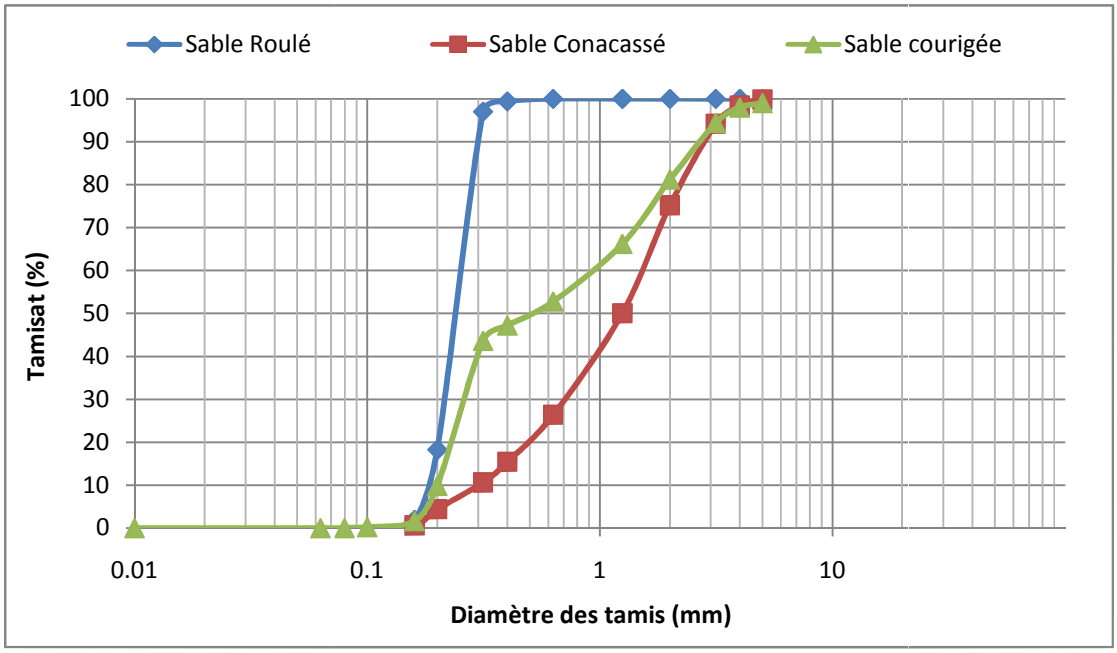


Figure. 3.3 : Courbe granulométrique des sables utilisées et leur mélange.

3.2.2.2. Gravier

Le gravier utilisé est un gravier concassé à deux classes granulaires (3/8 & 8/15) (Figure. 3.4 et 3.5) provenant de la carrière de Mont Guorno de la région de Berouaguia (Médéa) dont les propriétés physiques et mécaniques sont présentées au tableau 3.3 et l'analyse granulométrique est présentée dans la figure 3.6.



Figure. 3/4 : Gravier de Mont Guorno 3/8.



Figure. 3/5 : Gravier de Mont Guorno 8/15.

Tableau 3.3 : Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés.

caractéristiques	Fraction 3/8	Fraction 8/15	Normes
Masse volumique absolue (g/cm3)	**2.5**	**2.53**	NF EN 1097-6 **[70]**
Masse volumique apparente (g/cm3)	**1.29**	**1.27**	NF EN 1097- **[71]**
Taux d'absorption d'eau (%)	**0.598**	**0.795**	NF EN 1097-6 **[70]**
Résistance aux chocs (Los-Angeles)	**24.10**	**26.18**	NF EN 1097-2 **[73]**

D'après les résultats du tableau 3.3, il parait que les gros granulats sont de bonne qualité et peuvent être utilisés pour un béton.

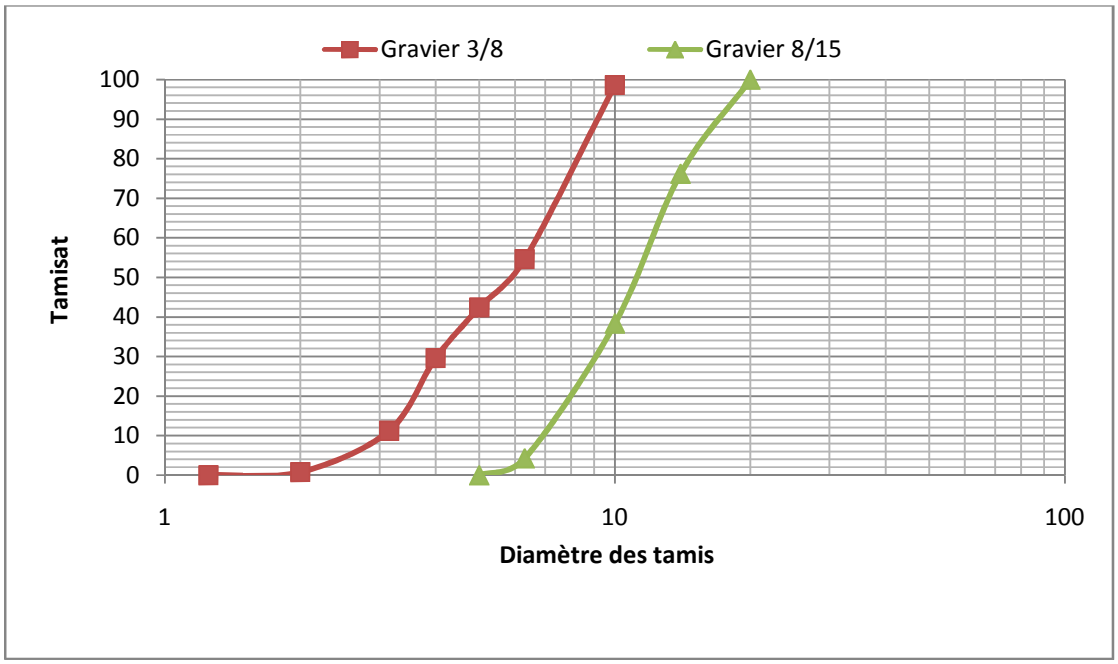


Figure. 3.6 : Courbe granulométrique des graviers utilisés.

3.2.3. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est l'eau du robinet de notre laboratoire sans passer par l'analyse chimique de cette eau. Sa température était comprise entre 10 et 22°C.

3.2.4. Le Superplastifiant

Le Superplastifiant utilisé est un haut réducteur d'eau commercialisé par l'entreprise GRANITEX sous le nom de MEDAFLOW 30. Conçu à base de poly carboxylates, cet adjuvant n'à aucun effet retardateur.

Caractéristiques :

Forme.....liquide
Couleur .....jaunâtre
PH .....6 – 6,5
Densité.....1, 07
Teneur en chlore..... < 1g/L
Plage de dosage recommandée : 0,5 à 2,0%

3.3. Méthodes d'essais

3.3.1. Essais sur béton à l'état frais

Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés définies ci-dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton avec les termes qualitatifs de fluidité, hétérogénéité et absence de blocage. Nous présentons dans cette partie les principaux tests empiriques qui sont destinés à caractériser l'ouvrabilité des BAP. Nous avons procédé à un certain nombre d'essais pour caractériser les bétons confectionnés à l'état frais.

3.3.1.1. Essais d'étalement au cône d'Abrams et T_{50}

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser. Cet essai permet d'évaluer l'écoulement en milieu non confiné**,** c'est-à-dire d'évaluer l'ouvrabilité ou la déformabilité du béton et de mesurer son étalement sous son propre poids sans obstacles.

Il s'agit de démoulerun cône normalisé (cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer le diamètre de la galette debéton obtenue (Figure 3.7). Le diamètre d'étalement du béton est mesuré suivant deux directions perpendiculaires, Le résultat est exprimé en moyenne des deux valeurs obtenues. Plus le diamètre est grand, plus le béton est capable de remplir les coffrages.

a. Matériel nécessaire

- Plaque métallique plane constituant un carré d'au moins 90 cm de côté et tracée au centre d'un cercle de 50 cm de diamètre pour la mesure du T_{50} ;
- Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa partie basse afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur ;
- Chronomètre
- Mètre ou réglet de 90cm.

b. Mode opératoire

- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon) ;
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur la plaque et équiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir ;
- Prélever un échantillon de béton représentatif ;
- Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône ;
- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire à l'aide d'une truelle ;
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées ;
- Lancer le chronomètre dès le soulèvement du cône jusqu'à ce que le béton atteigne le cercle de 50 cm tracé sur la plaque, cette mesure c'est le T_{50} ;

- Une fois que le béton s'est étalé sur la plaque, mesurer le diamètre final sur deux côtés perpendiculaires, Le résultat est exprimé en moyenne des deux valeurs obtenues.

- Détecter visuellement si il y a des signes de ségrégation de béton (comme présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette et accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).

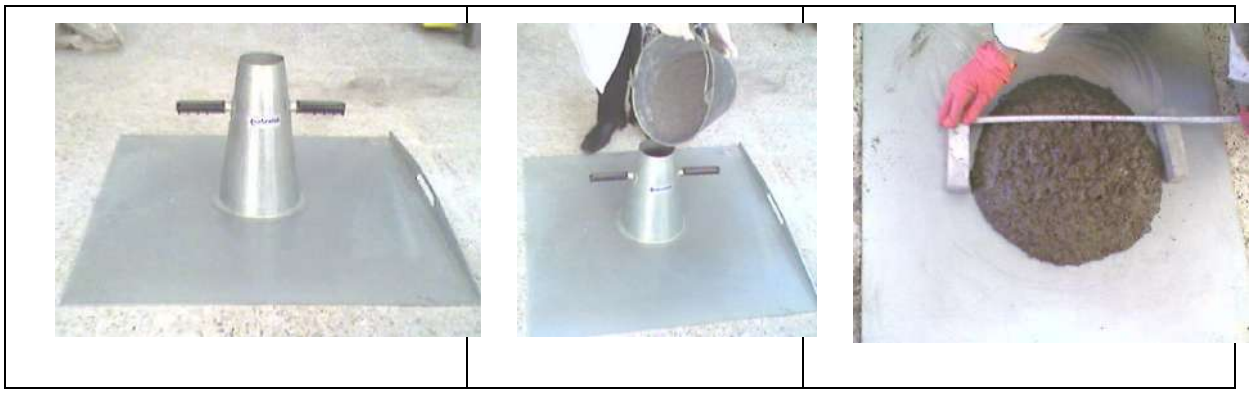


Figure 3.7 : Protocole de l'essai d'étalement au cône d'Abrams**[20]**

3.3.1.2. Essai d'entonnoir en V (V-funnel)

L'entonnoir est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. L'entonnoir est rempli de béton et le temps pour lequel le béton prend pour couler à travers le dispositif est mesuré.Ce temps mesuré indique la fluidité et caractérise la capacité du béton à se déformer à travers des zones confinées par son passage par l'ouverture du col du dispositif (Figure 3.8).

a. Matériel nécessaire

- Entonnoir en V (V-funnel)
- Chronomètre ;
- Un seau de capacité de 12 litres.

b. Mode opératoire

- Placer le V-funnel dans un endroit stable et s'assurer que le clapet est bien fermé ;
- Prélever dans un seau un échantillon de béton représentatif d'environ de 12 litres ;
- Remplir l'entonnoir avec le béton ;

- Mettre le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir et ouvrir le clapet ;
- Remplir l'entonnoir une deuxième fois de béton ;
- Mettre le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir ;
- Après une attente de 10 secondes, ouvrir le clapet en déclenchant le chronomètre ;
- Arrêter le chronomètre quand la première lumière est apparue à travers l'orifice de l'entonnoir, cette mesure est le temps d'écoulement T_{VF} ;
- Refaire l'essai 3 fois ;
- Le résultat est la moyenne des trois valeurs du temps d'écoulement obtenues.



Figure 3.8 : Protocole de l'essai d'entonnoir (V-funnel) **[20]**

3.3.1.3. Essai de stabilité au tamis

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité du béton livré sur chantier (Figure 3.9).

a. Matériel nécessaire

- Seau de 10 litres de capacité + couvercle ;
- Tamis 5 mm + fond ;
- Balance : précision minimale 20 gr, portée minimale 20 kg ;

b. Mode opératoire

- Prélever un échantillon de béton de 10 litres juste après le malaxage ;
- 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 le tamis + fond sur la balance et faire la tare ;
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire ressuage à la surface du seau après 15 minutes ;
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4.8 kg (tolérance ± 0.2 kg), verser ce béton au centre du tamis d'une hauteur de chute de 50 cm ± 5 cm ;
- Noter le poids de l'échantillon ;
- Attendre 2 mn ;
- Peser le fond avec la laitance : on a $\boldsymbol{P}_{\text{laitance}} = \boldsymbol{P}_{\text{fond+laitance}} - \boldsymbol{P}_{\text{fond}}$;
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P = \frac{\text{Masse de laitance}}{\text{Masse de l'échantillon}}.100$$



Figure 3.9: Protocole de l'essai de stabilité au tamis **[20]**

3.3.2. Essais sur béton à l'état durci

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

3.3.2.1. Essai de Compression

La résistance en compression a été mesurée par compression axiale d'éprouvettes cubiques de dimensions (15×15×15) cm, à 7 et 28 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 kN (Figure 3.10). La résistance en compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai.



Figure 3.10. Essai de compression

3.3.2.2. Essai de traction

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

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2a^3}$$

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

$$\sigma_t = 1.8\frac{PL}{2a^3}$$

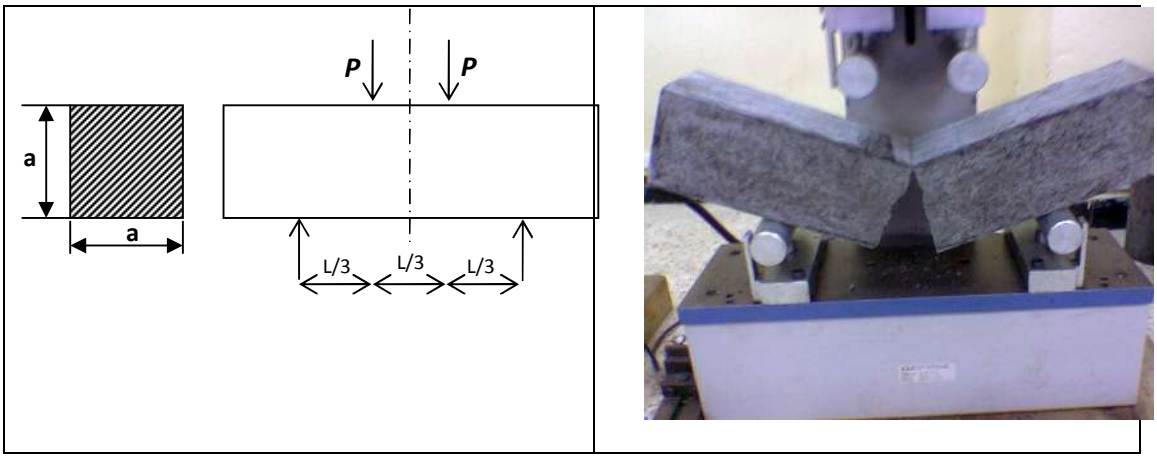


Figure 3.11 : Essai de flexion en quatre points

3.4. Séquences de malaxage

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

Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 50 litres. Selon les caractéristiques souhaitées et les composants du béton, les auteurs suivent plusieurs séquences.

Pour notre cas, la séquence suivie est celle décrite dans figure 3.15 ; elle suit les étapes suivantes :

- Calculer la quantité d'eau effective que l'on va mettre dans la bétonnière. Ce calcul permet de prendre en compte l'eau contenue dans les gros granulats et le sable tout en connaissant le coefficient d'absorption de chacun (voir Annexe A) ;
- Calculer les proportions du ciment, sable, gravier 3/8, gravier 8/15 et superplastifiant (Annexe A) ;
- Malaxer le sable, ciment, laitier et gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) ;
- Ajouter pendant 1 minute le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) ;
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Malaxer pendant 30 secondes.

La séquence de malaxage suivie est la même pour tous les mélanges de bétons.

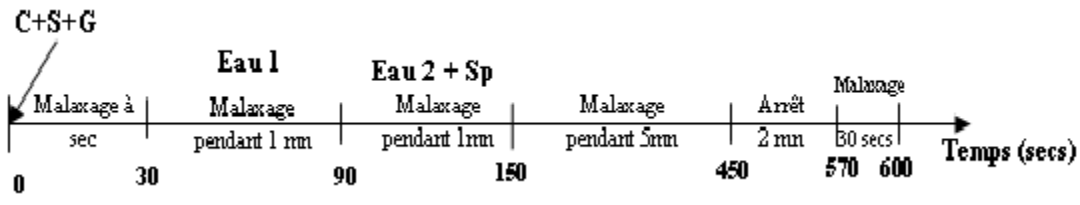


Figure 3.12 : Séquence de malaxage du béton autoplaçant

Avant de procéder à chaque essai, on doit remalaxer le mélange de béton juste avant l'essai comme le montre la figure 3.13.



Figure 3.13: Malaxage du béton autoplaçant

3.5.Récapitulatif du programme des essais réalisés

Le but visé dans cette partie est de chercher l'effet de la nature et les dimensions des granulats sur l'ouvrabilité et la résistance mécanique sur le BAP. Donc le nombre totale d'essai à effectuer est 50 essais.

- **Essais sur béton à l'état frais**

Le diagramme suivant (Figure 3.14) résume les essais réalisés sur le béton à l'état frais.

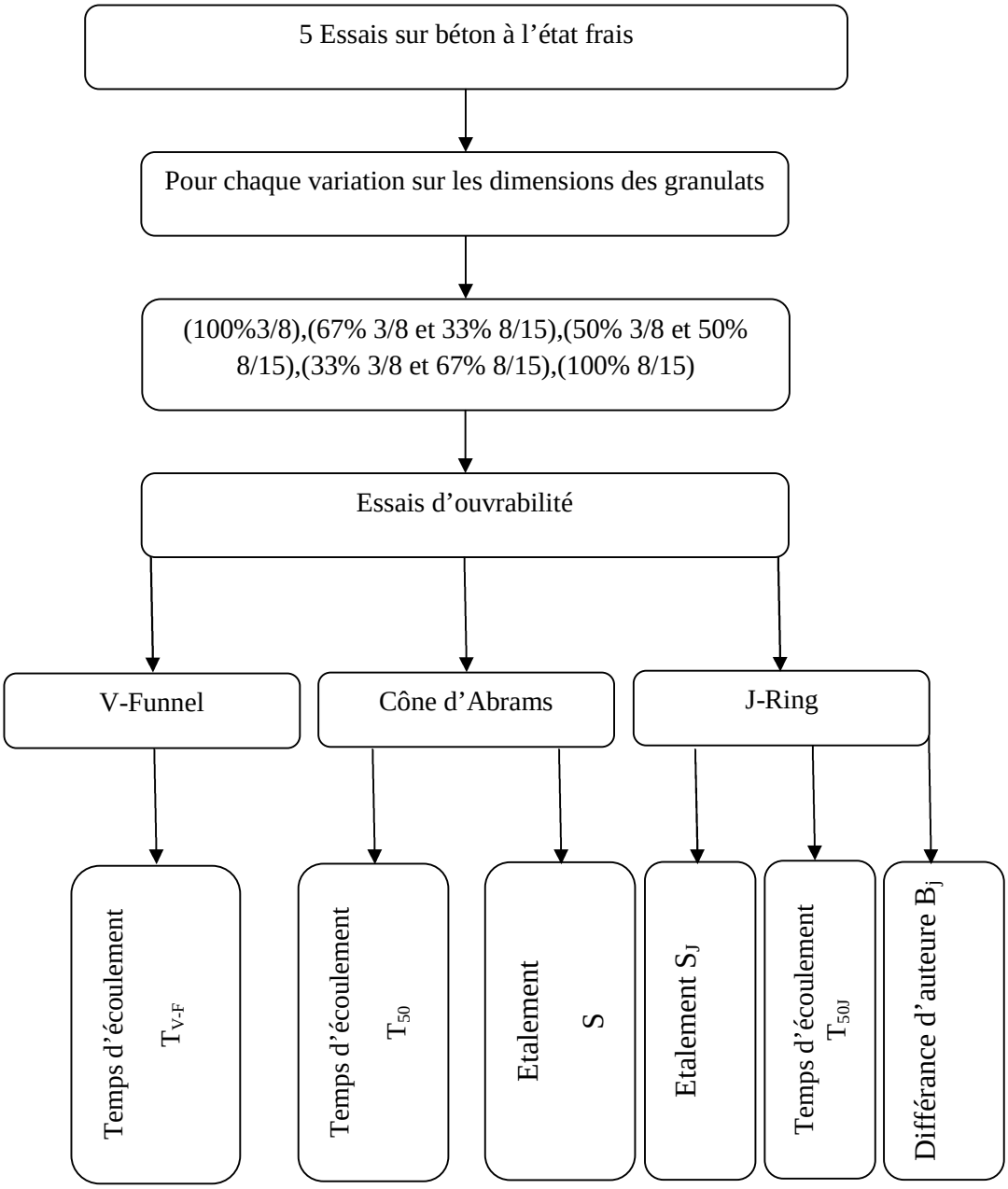


Figure 3.14 : Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais.

- **Essais sur béton à l'état durci**

Le diagramme suivant (Figure 3.15) résume les essais réalisés sur le béton à l'état durci.

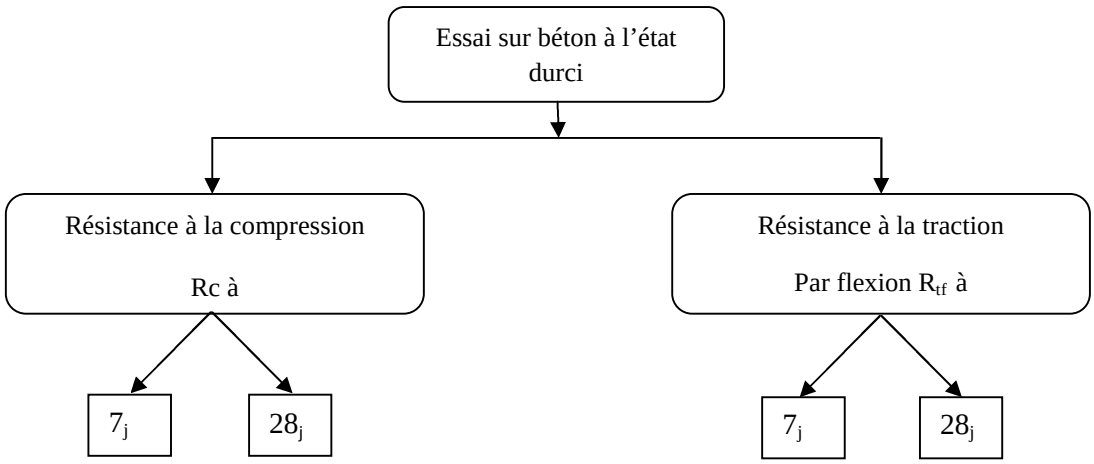


Figure 3.15 : Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci.

CHAPITRE 4 :

Analyse et discussion des résultats

4.1. Introduction

L'objet de ce chapitre est l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus pour les différents essais réalisés. Nous nous intéresserons à l'étude des résultats des essais effectués sur le BAP après avoir fixé tous les paramètres avec pour seule variable le pourcentage de deux graviers 3/8 et 8/15, Nous étudierons ensuite l'effet de la nature et les dimensions des granulats sur l'ouvrabilité et la résistance mécanique des BAP.

4.2. Effet de la dimension des granulats sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais

L'effet de la dimension des granulats sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants à l'état frais est analysé à travers une série d'essais particuliers aux BAP, qui nous permettent d'étudier la variation de l'ouvrabilité en fonction de la dimension des granulats. Il est important dans cette partie de contrôler surtout la grande fluidité et la grande résistance à la ségrégation. Le tableau 4.1 donne la composition des cinq (5) bétons testés.

Tableau 4.1 : Composition des BAP testés

			BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Gravier (3/8)		%	100	67	50	33	0
		Kg/m^3	840	560	420	280	0
Gravier (8/15)		%	0	33	50	67	100
		Kg/m^3	0	280	420	560	840
Ciment		(kg/m^3)	418	418	418	418	418
Sable		(kg/m^3)	954	954	954	954	954
Eau		(kg/m^3)	167	167	167	167	167
Superplastifiant	PC	%	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		(Kg/m^3)	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27

Le tableau 4.2 donne les résultats des différents essais sur l'ouvrabilité des cinq BAP à l'état frais.

Tableau 4.2 : Résultats d'essais d'ouvrabilité

		super	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Essai d'Etalement	Temps d'Ecoulement T50 (sec)	MEDAFLOW 30	0.89	1.23	1.3	1.5	1.7
	Etalement S (mm)	MEDAFLOW 30	790	645	610	670	590
Essai J-Ring	Temps d'Ecoulement $T50_J$ (sec)	MEDAFLOW 30	1.5	2.6	2.9	3.1	3.9
	Etalement S_J (mm)	MEDAFLOW 30	710	590	550	560	520
	Différence d'Hauteurs B_J (mm)	MEDAFLOW 30	12.3	9.5	8.5	7.2	5
Essai V-Funnel	Temps d'écoulement (sec)	MEDAFLOW 30	3.7	4	6.12	5.2	7.5
Essai de ségrégation sur Tamis de 5 mm	Mortier passant à travers le Tamis (%)	MEDAFLOW 30	9.64	6.88	5.48	12.03	18.84

4.2.1. Etalement et Temps T50 au cône d'Abrams

Pour un BAP l'essai de cône d'Abrams permet de mesurer l'ouvrabilité du béton en milieu non confiné. Il consiste à mesurer le diamètre d'une galette de béton après soulèvement du cône.

Les valeurs cibles de l'étalement sont typiquement dans une fourchette de 60 à 75 cm.

La figure 4.1 montre l'effet de la variation des dimensions des granulats sur l'étalement. On note que les valeurs d'étalement, pour le mélange du béton confectionné avec le gravier 3/8 de la proportion 100%, est plus élevé que ceux pour les mélanges avec les autres variations des proportions des granulats entre le 3/8 et 8/15. On observe également sur cette figure, pour les différents mélanges réalisés, que l'étalement augmente lorsque le pourcentage des granulats utilisé à faible dimension augmente (3/8).

Aarre et Domone **[74]** proposent un étalement entre 650 mm et 700 mm pour obtenir un bon béton Autoplaçant.

On observe que la réduction du volume de gros granulats et par conséquent l'augmentation du volume de mortier, contribue significativement à l'amélioration de l'étalement et réduire le temps d'écoulement.

Cette amélioration est due principalement à la réduction de la teneur des gros granulats de la classe 8/15, car l'augmentation du volume des gros granulats provoque un freinage surtout dans le cas des granulats concassés où le frottement entre les granulats est important.

On remarquant que les résultats sur la figure est augmente graduellement sauf le BAP 4 chez un grand étalement par apport les autre.

On constate que le BAP5 a une limite autoplaçante basse; il est homogène et présente des risques de ségrégation statique et de ressuage, il a un faible taux de remplissage et unétalementinférieurà60cm.

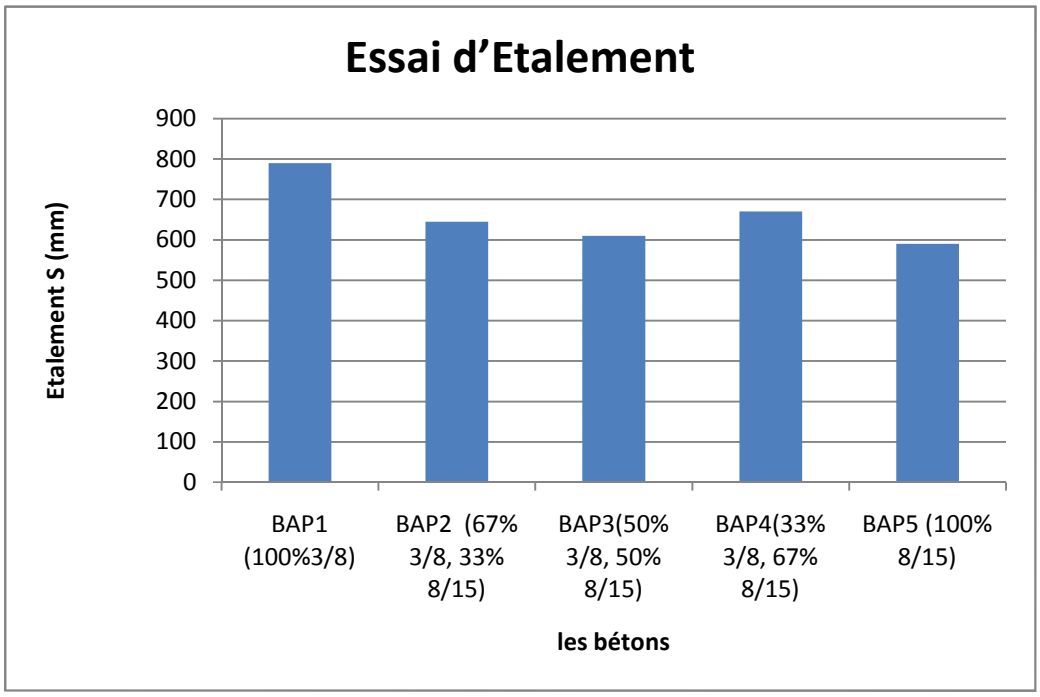


Figure4.1 : Etalement en fonction des dimensions des granulats.

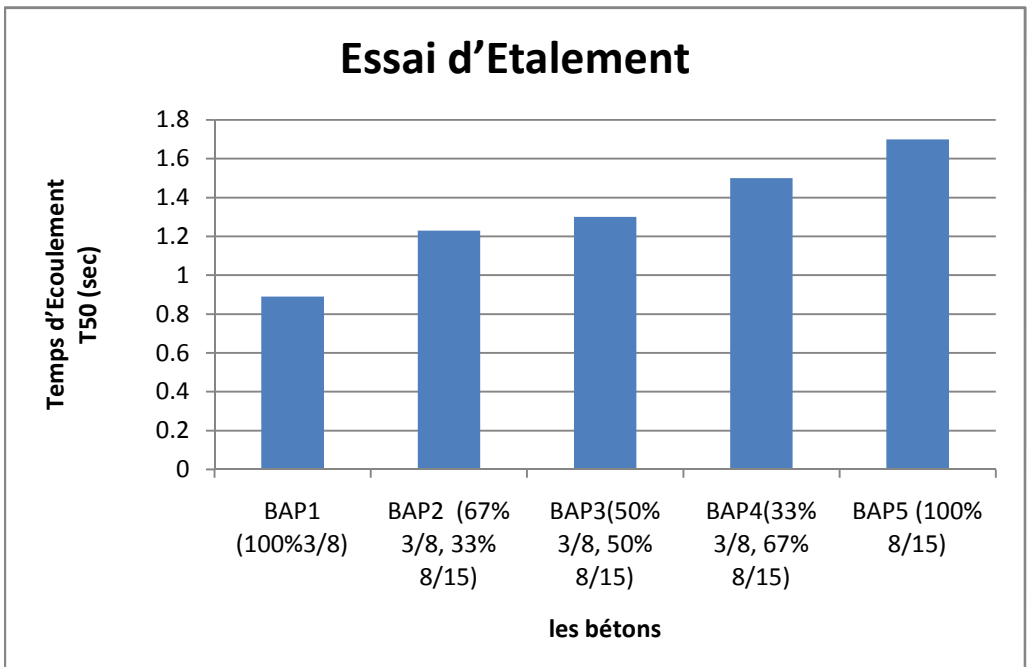


Figure.4.2: Temps d'Ecoulement T50 en fonction des dimensions des granulas.

La figure 4.2 montre l'effet de la variation des dimensions des granulats sur le temps d'écoulement T50, il est clair que le temps d'écoulement dans le BAP1 est le plus bas, et nous remarquons aussi que le temps d'écoulement T50 augmente lorsque la dimension des gros granulats 8/15 augmente.

Sonebi et Bartos **[75]**, ont pu obtenir un temps T50 inférieur à 2 secondes avec un mélange de BAP contenant environ 40% de pâte en plus par rapport à un béton ordinaire.

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

Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du pourcentage de la dimension des granulats sont représentés sur la figure 4.3. Cet essai indique la capacité de remplissage du mélange. On trouve que toutes les valeurs sont acceptables jusqu'à la proportion de 100% de gravier 8/15.

Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) montre que le temps d'écoulement varie inversement avec la dimension des gros granulats 8/15.

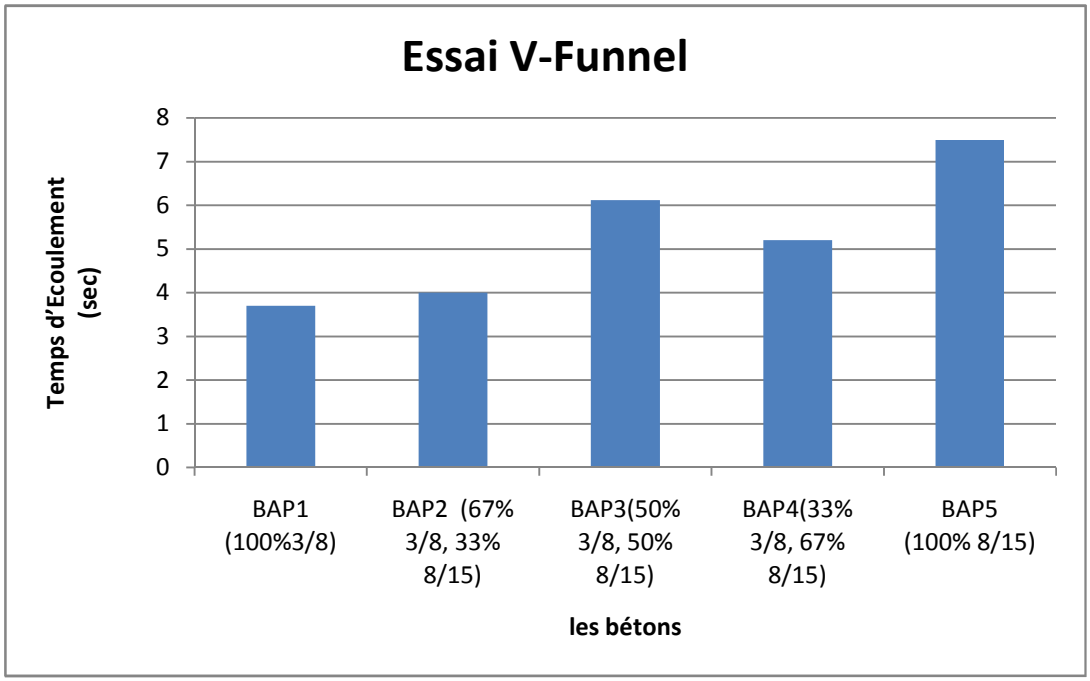


Fig.4.3 : Temps d'écoulement à l'Entonnoir en V en fonction des dimensions des granulats.

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

L'essai J-Ring est facile à utiliser et fournit une bonne mesure de la perte d'ouvrabilité en présence obstacles. Pour cela Daczko **[76]** recommande de faire la comparaison entre les mesures d'étalement sans et en présence du J-Ring. Ajouté à cela nous avons jugé utile d'étendre cette comparaison au temps d'écoulement T50.

(a) Etalement

La figure 4.4 montre la variation de l'étalement sans et avec le J-Ring. On remarque bien clair la différence des valeurs d'étalement des mélanges entre l'absence et la présence du J-Ring. La ségrégation est présente et visible par le blocage des gros granulats à l'intérieur de l'anneau (J-Ring) pour le BAP4 et BAP5 est remarquable.

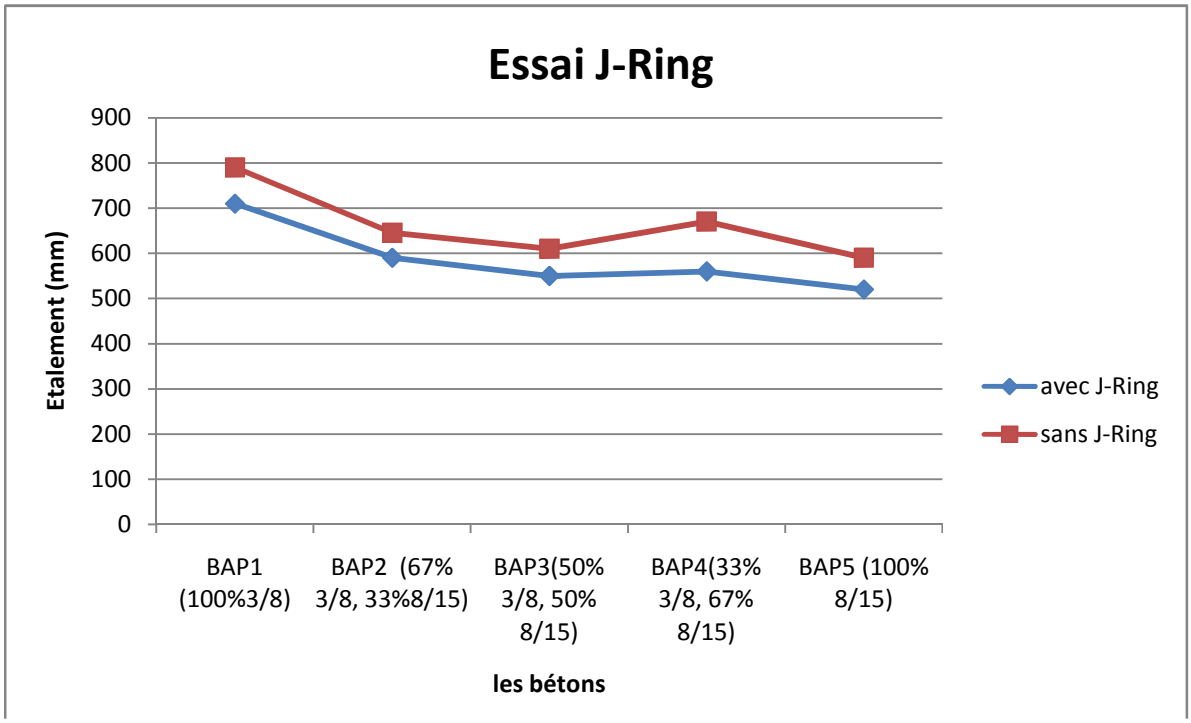


Figure.4.4 : Etalement sans et avec J- Ring avec PC en fonction des dimensions des granulats

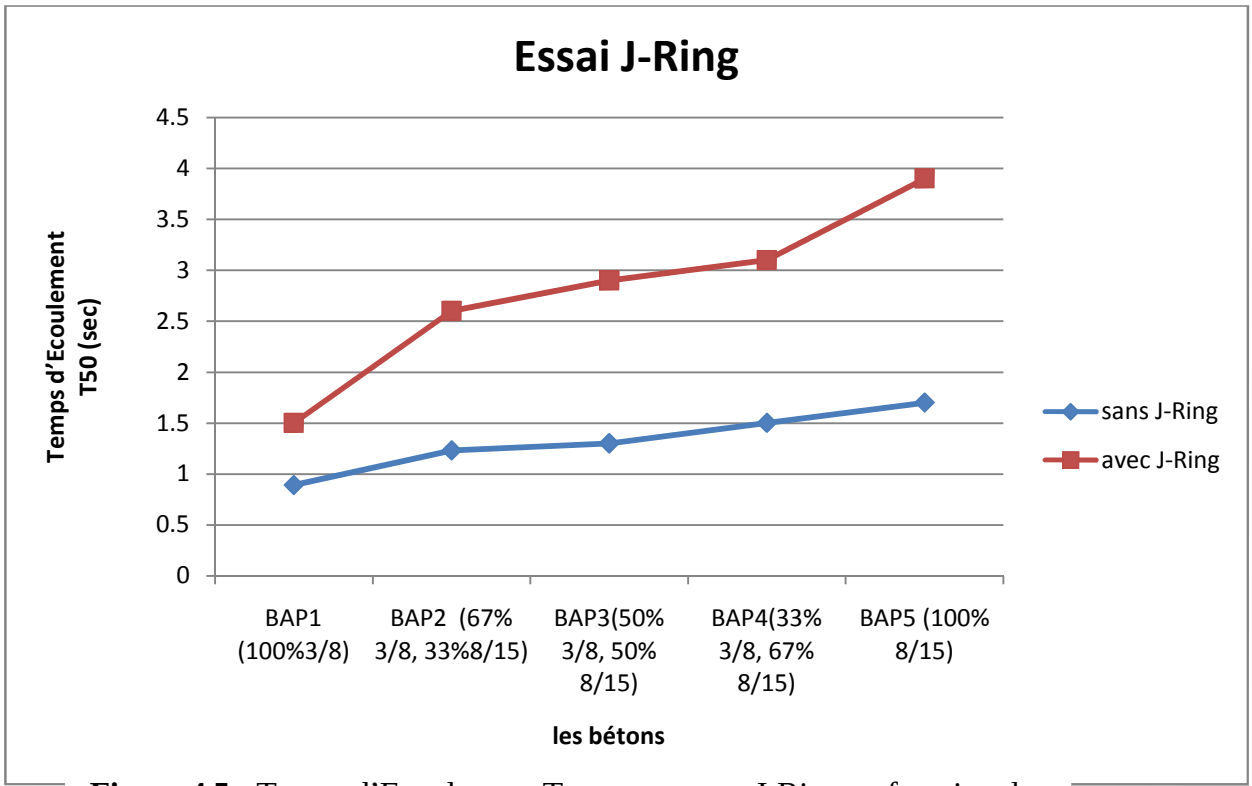


Figure.4.5 : Temps d'Ecoulement T_{50} sans et avec J-Ring en fonction des dimensions des granulats.

La figure 4.5. Montre la variation du temps d'écoulement $T_{50,}$ sans et avec le J-Ring, en utilisant les différentes proportions des granulats. Le temps d'écoulement T_{50} en présence du J-Ring provoque un retard considérable par rapport à celui en l'absence du J-Ring et ceci pour les différents dimensions des granulats surtout pour le BAP5. Ce temps est minimal pour le BAP1.

4.2.4. Différence de hauteurs au cône d'Abrams

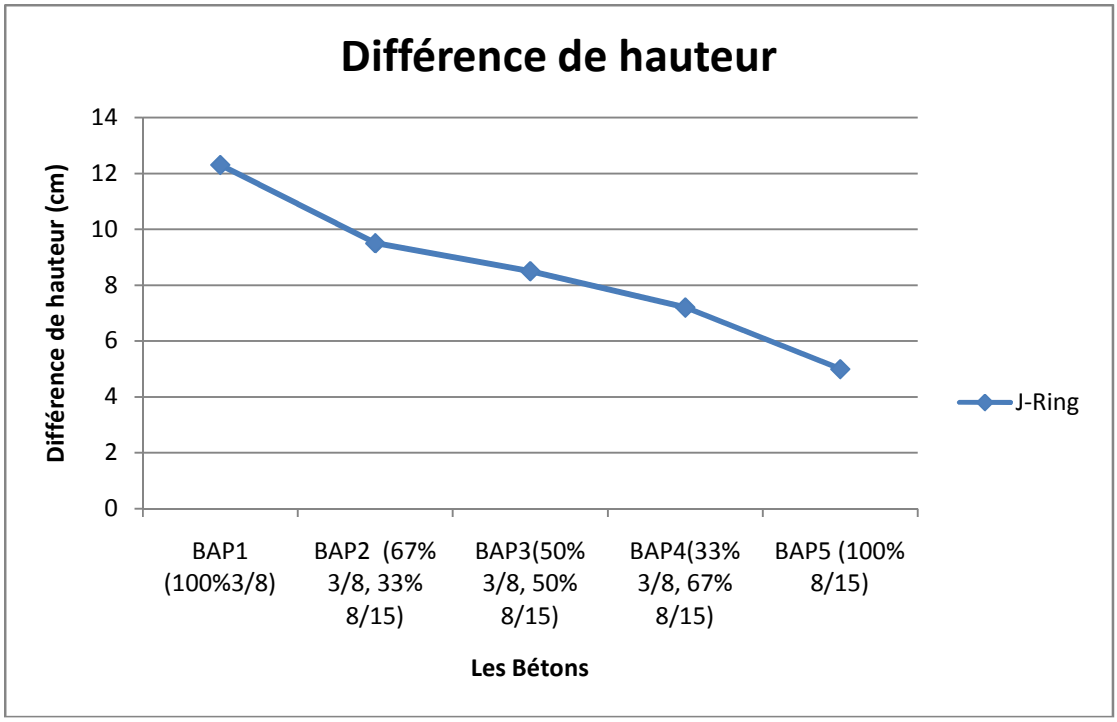


Fig.4.6 : Différence de hauteurs B_J en fonction de la dimension des granulats

La figure 4.6 montre la variation de la différence de hauteurs en présence du J-Ring en fonction de la dimension des granulats. La mesure de la différence de hauteurs se fait uniquement en présence du J-Ring et on compare les hauteurs des mélanges à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring. Cette différence de hauteurs diminue avec l'augmentation de la proportion des graviers 8/15 dans le mélange jusqu'à 100%, cette différence augmente fortement à cause de la présence de ségrégation dans le mélange. Dans la littérature la différence de hauteurs à ne pas dépasser 10cm. Dans notre cas on remarque que cette différence est supérieure à 10 mm dans le BAP1, ce qui veut dire qu'on lorsque en diminue la dimension

des granulats le déférence d'hauteur augmente.

4.1.6. Résistance à la Ségrégation par Tamisage

La figure 4.7 montre les résultats des pourcentages de laitance passant à travers un tamis de 5 mm pour déterminer le degré de ségrégation des mélanges en fonction de la dimension des granulats

D'après cette figure on peut noter que pour les mélanges BAP1 et BAP2 et BAP3 que le béton est homogène avec un peu des signes de ségrégation.

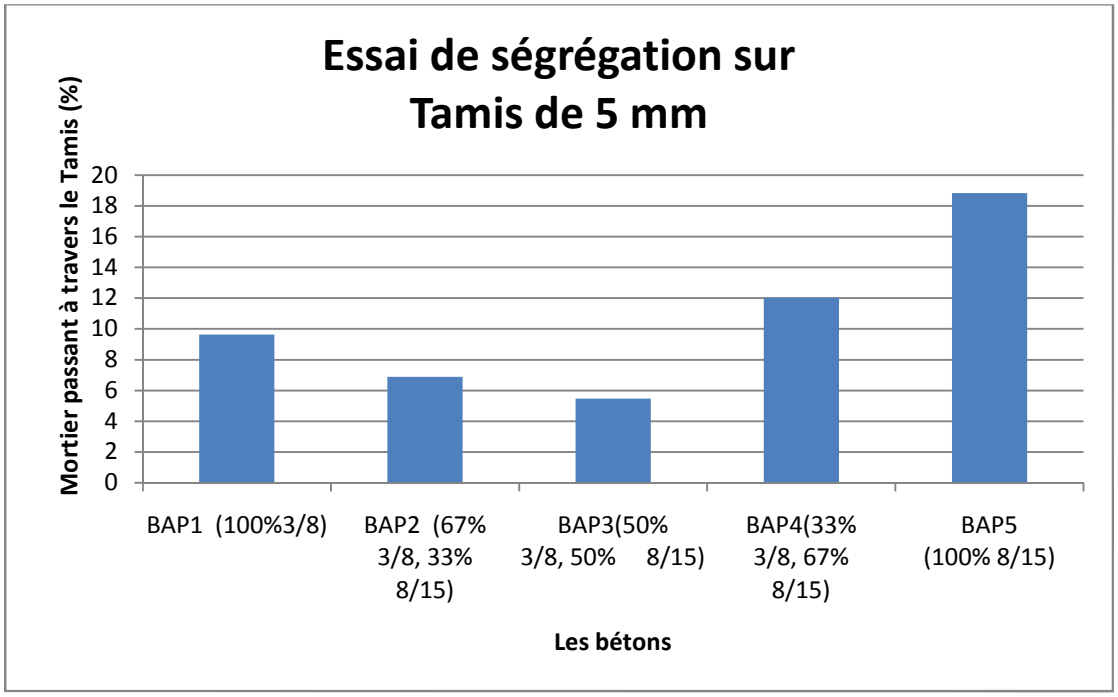


Figure 4.7 : Résistance à la Ségrégation au Tamis en fonction Des dimensions des granulats

On remarquant sur le BAP5 visuellement qu'il y a des signes de ségrégation de béton (comme blocage à travers les armatures du J-Ring).

Safawi et al. **[77]** ont montré que le temps d'écoulement au V-Funnel est un outil adapté pour décrire la tendance de la ségrégation. Ainsi pour de très faibles temps d'écoulement (inférieures à 2 secondes) la tendance au béton à ségréguer est très élevée, ce qui implique que les mélanges à faible viscosité sont facilement ségrégués.

4.3. Effet de la dimension des granulats sur les résistances mécaniques des BAP à l'Etat durci

Dans cette partie de ce chapitre, nous avons étudié l'évolution des propriétés mécaniques (résistance en compression et en traction) des bétons effectuée à 7 jours et 28 jours. Les bétons préparés avec cinq mélanges à différant proportion de gravier 3/8 et gravier 8/15 ont été comparés.

Tableau 4.3 : Résultats des résistances mécaniques en fonction de la dimension des granulats.

		Résistances R_c et R_t (en MPa)				
Jours	Nature de la Résistance	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
7	Compression	37	44.77	35.02	40.24	39.98
	Traction	4.02	4.66	4.30	4.34	3.98
28	Compression	52.12	54.77	49.06	51.5	56.31
	Traction	4.2	5.9	6.54	5.2	4.85

- **Résistance à la Compression**

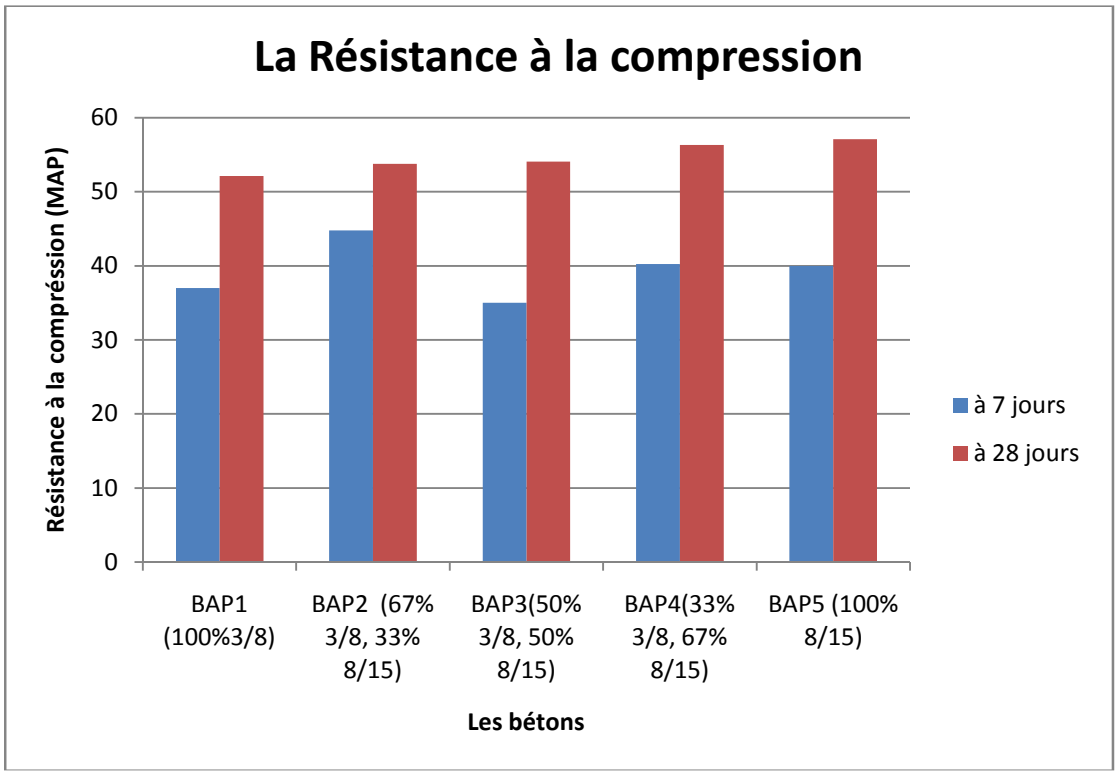


Figure. 4.8 : Variation de la Résistance à la Compression en fonction du Temps

D'après le tableau 4.3 et la figure 4.8, on trouve que le BAP5 (100% de 8/15) a favorisé les meilleures résistances à la compression par rapport aux quatre autres combinaisons granulaires.

A 28 jours, on a remarqué que la résistance à la compression du BAP4 a donné une valeur de résistances dépassant 56 MPA, par contre les autres compositions donnent des valeurs de résistances entre 49 et 54MPA

Donc on déduit que la résistance à la compression augmente lorsque la proportion des gros granulats (8/15) est élevée.

- **Résistance à la Traction**

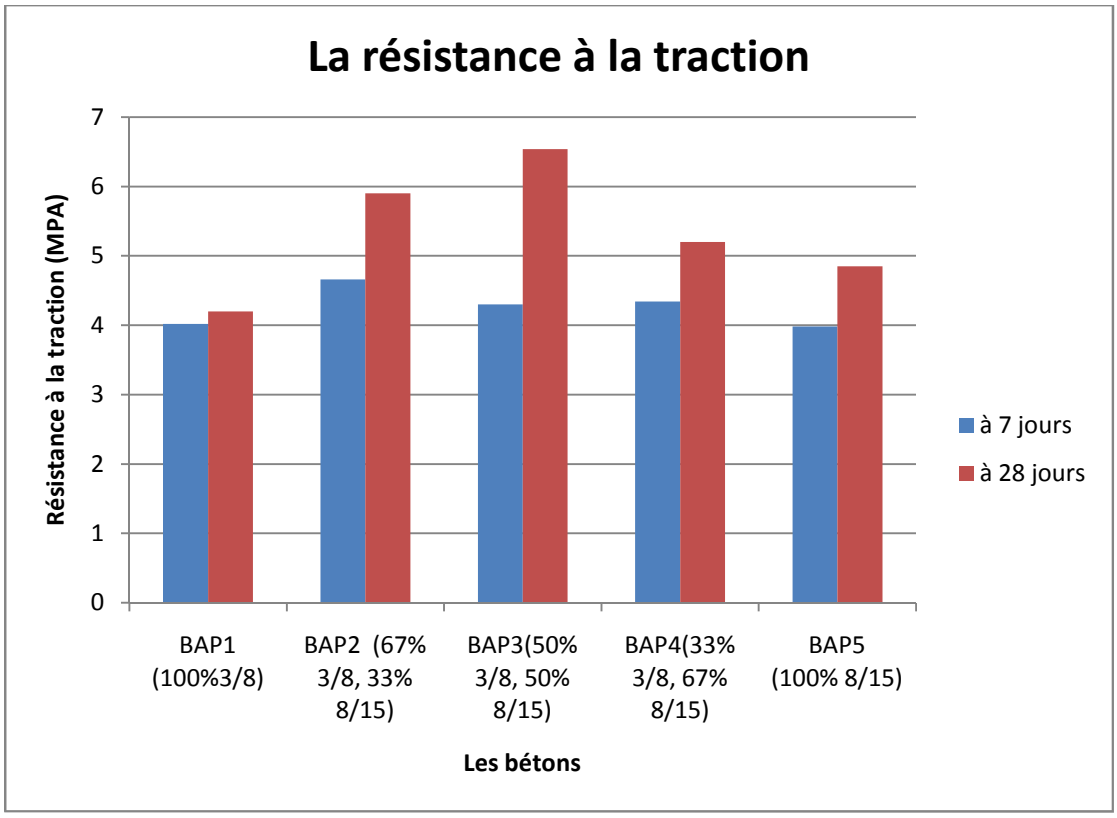


Figure. 4.9 : Variation de la Résistance à la traction en fonction du Temps

- **Interprétation et discussion**

D'après la figure 4.9, à 28 jours, on constate que la résistance à la traction d'un BAP3 (50% 3/8 et 50% 8/15) donne les meilleures valeurs. Pour ce même mélange, nous constatons la nette amélioration de la résistance à la traction entre 7 et 28 jours comparativement aux autres mélanges.

Conclusions générale

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATION

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux dont les qualités méritent d'être valorisées. En raison de leurs propriétés rhéologiques très spécifiques, leur compréhension nécessite des investigations plus approfondies. Dans ce travail, nous avons considéré un des paramètres, pour savoir l'effet de la nature et la dimension des granulats sur le l'ouvrabilité et la résistance mécanique du béton autoplaçant de cinq mélanges différents.

Des essais ont été menés en variant le pourcentage de deux classes de graviers (3/8) et (8/15) afin de pouvoir étudier leur influence sur les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton autoplaçant.

Les résultats expérimentaux montrent un certain nombre de conclusions qu'on résumera comme suit :

- Il est tout à fait possible de fabriquer un béton autoplaçant présentant les meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques dans les conditions Algériennes.
- Ce qui rend cette étude plus ardue est, d'une part, le manque de matériel sophistiqué pour la réalisation des essais. Et d'autre part le manque de temps nécessaire pour l'observation de différents phénomènes à long terme comme le retrait et la fissuration.
- À l'essai au cône d'Abrams, le BAP, du fait de sa fluidité s'étale et forme une galette dont on mesure le diamètre, qui dépasse souvent les 540 mm. La notion traditionnelle d'affaissement au cône d'Abrams n'a plus aucun sens avec ce genre de béton.
- l'utilisation de superplastifiant améliore considérablement les performances du béton.. Meilleure ouvrabilité et résistance mécanique …
- Le diamètre d'étalement d'un BAP augmente lorsqu'on diminue le volume de gravier de la fraction 8/15.
- Les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec l'augmentation des teneurs en gros granulats (8/15).
- Un mélange donnant une bonne capacité de remplissage ne donne pas forcément une bonne capacité de passage.

- La résistance en compression et en traction sont très grandes comparées à celles d'un mélange de béton ordinaire.
- la résistance à la compression du BAP est optimale à 35MPa pour 7 jours et 60MPa pour 28 jours pour les mélanges à base du sable roulée 33% et sable concassé 67% et gravier 3/8 et 8/15.
- la résistance à la traction du béton autoplaçant est meilleure pour un béton auto-plaçant à base de gravier 50% (3/8) et 50% (8/15) le BAP3.

Recommandations

Les analyses et les observations effectuées dans le cadre de ce travail pourraient mener à l'amélioration de la qualité de béton dans les chantiers Algériens ; en particulier; les aspects suivants restent à aborder :

- Faire varier les proportions de la pate et des granulats.
- Des études restent à mener en ajoutant d'autres constituants du BAP (ajouts minéraux – agents de viscosité) … avec les granulats 3/8 et 8/15.
- Des études restent à mener sur des graviers roulés et légers
- Faire varier les proportions du sable par rapport au gravier.
- Etudier l'influence d'utilisation de différents pourcentages de fines dans le sable.

RÉFÉRENCES

[1] Baron J. et Ollivier J.P., *« Les bétons – Bases et données pour leur formulation »* Editions Eyrolles, 1996, 243 p.

[2] Okamura H. and Ouchi M. « Self-compacting concrete » Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp. 5-15.

[3] Okamura. H, and M. Ouchi, «S*elf Compacting Concrete: Development, present use and future*», In self compacting concrete: Proceedings of the first international RILEM symposium, A. Skrendahl, and O. Petersson, Eds. RILEM Publications, Cachan, France, 1999.

[4] Walraven *« Structural aspect of self-compacting concrete »* proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 15-22.

[5] Association française de Génie Civil (AFGC) *« Bétons Auto-PlaçantsRecommandations provisoires »* juillet 2002, 63 pages.

[6] Billberg P. *« Form Pressure generated by self-compacting concrete »* Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 271-280.

[7] H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi. «*Self-compacting concrete*». Structural Concrete, 17, March 2000.

[8] Hanaa RARES *« Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés àune température élevée »*07 Décembre 2009

[9] Sedran T., "*Les bétons autonivelants - Synthèse bibliographique*", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, pp. 53-60, mars-avril, 1995.

[10] Hasni L., "*Bétons autoplaçants - Synthèse bibliographique*", rapport derecherche CEBTP, 46 p., juillet 1999.

[11] C. Ozyildrim, D.S. Lane, « *Investigation of Self Compacting Concrete* », Virginia Transportation Research Council, 2003.

[12] Maher EL BARRAK **«** *contribution à l'étude de l'aptitude a l'écoulement des bétons autoplaçant à l'état frais »*

[13] Ozawa. K, et. al. «*Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures*», Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction

(EASEC), Vol.1, pp 445-450, January, 1989

[14] K.Ozawa, S.Tagtemsirikul, and K.Maekawa, «*Role of materials on the filing capacity of fresh concrete*», In Proceedings of The Fourth CANMET and ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, American Concrete Institute, May1992, pp212-137.

[15] G.Dreux, J.Festa, «*Nouveau Guide du Béton et Ses Constituants* », 8ème Edition, Edition Eyrolles.1998.

[16] F.Buyle, Bonin, «*Bétons autoplaçants* ».

[17] J-C.BRAQUENIER et J.DESNYTER, *le béton autoplaçant ou autocompactant*, 2000.

[18] Z. ABIB, « *Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants* », thèse de magister USTHB, 2004

[19] Holcim *« Le béton autocompactant Recommandation »* Suisse, SA, Version 26.11.2004

[20] ROUIS F. *« formulation et propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant a basse ciment pouzzolanique et (ou) ciment de laiter »*

[21] EL BARRAK M. *« Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplacants à l'état frais »* Thèse de Doctorat de l'université toulouse III – Paul Sabatier, Juillet 2005, 228 pages.

[22] Bethmont S. *« Mécanismes de segrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) Etude expérimentale des intéractions granulaires »* Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Décembre 2005.

[23] Jin J. *« Properties of mortar for self-compacting concrete »* PhD thesis, University College London, 2002, 398 pages

[24] Flatt R.J. *« Polymeric dispersants in concrete. In Polymers in particulatesystems - Properties and applications »* Marcel Dekker, Inc., 2002, 249 pages.

[25] Uchikawa H., Hanehara S., and Sawaki D. *« The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture »*Cement and Concrete Research, 1997, vol 27, pp. 37–50.

[26] Neubauer C.M., Yang M. and Jennings H.M. *«Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspenions - effects of*

admixtures » Advanced Cement Based Materials, 1998, vol 8, pp. 17–27.

[27] Jarny S. *« Thixotropie des pâtes cimentaires »* Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Décembre 2004, 233 pages.

[28] Flatt R.J., Houst Y.F., Bowen P., Hofmann H., Widmer J., Sulser U., Maeder U. and Bürge T.A. *« Interaction of superplasticizers with model powders in a highly alkaline medium »* In Fifth CANMET/ACI International Conference, 1997

[29] Boukendakdji O *« etude de l'influence des parameters de formulation sur les proprieties d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires »*

[30] NF EN 1008 *« Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement : P18-211) »*, Juillet 2003.

[31] König G., Dehn F., Weise F. and Hertel C. *«Applications of ready-made binders for self-compacting concrete (SCC)»* Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete , Japan, 2001, pp. 361-367.

[32] Khayat K.H., « *Viscosity-Enhancing Admixtures for cement-based materials - An overview* » Cement and Concrete Composites, 20, pp. 171-188, 1998.

[33] Agarwal S.K., Masood I. and Malhotra S.K. *« Compatibility of superplasticizerswith different cements »* Construction and Building Materials, 2000, vol 14, pp. 253-259.

[34] Botte, Burdin, Zermatten, « *SCC Tunnrl Applications* » CleusonDixence Project Proceendings of the First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, 13-15 September 1999.

[35] P.L. Domone, J.Jing, « *Properties of Mortar for Self Compacting Concrete* », Proceedings of RILEM International Symposium on SCC, Stockholm, September 1999, RILEM Proceedins PRO 7, Paris pp109-120.

[36] T. Nawa, T. Izumi, Y. Edamatsu «*State- of- the-art- report on materials and design of self compacting concrete*» Proc of Int. Workshop on Self-

compacting Concrete, ed K. Ozawa and K. Ouchi, Kochi University of Technology, Japan, August 1998, 166-190.

[37] H.Chai, « *Design and testing of SCC*» Ph.D thesis, University of London, April 1998

[38] Efnarc « *The European guidelines for self compacting concrete* » The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. www.efnarc.org, 2005, 68p

[39] Sonebi M. and Bartos P.J.M. *« Filling ability and plastic settlement of selfcompacting concrete »* Materials and Structures, 2002, Vol 35, pp. 462-469.

[40] Association Française de Génie Civil, « *Béton auto-plaçants-Recommandations provisoires »*, documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.

[41] Walraven J., «*Structural aspects of self compacting concrete»*, Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp, 15-22, 2003.

[42] Projet Région *«Amélioration des constructions par l maîtrise des BAP »* du conseil Régional Midi-Pyrénées dans la thématique de recherche « l'homme et sa région », 131 p., 2005

[43] Grünewald S., Walraven J.C., *«Rheological measurements on self-compactingfibre reinforced concrete»*, Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49-58, 2003.

[44] Nielsson I., Wallevick O.H., *«Rheological evaluation of some empirical test methods – preliminary results»*, Proceedings of the Third Internationl Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 59-68, 2003.

[45] Daczko J.A., *«A comparison of passing ability test methods for selfconsolidating concrete»*, Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 335-344, 2003.

[46] Utsi S., Emborg M., Carlswärd J., *«Relation between workability andrheological parameters»*, Proceedings of the Third International

Symposium onSelf-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 154-164, 2003.

[47] Bui V.K., Akkaya Y., Shah S.P., *«Rheological Model for self-consolidating concrete»*, ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre 2002. [CAL] Calcia, "Mode d'action des adjuvants", document Calcia.

[48] SCC, «*Guidelines Task 9, End Product*», BriteEuRam project BE 96-3801, Rational production and improved working environment through using SCC, February 2000.

[49] ENFAC, SCC, « *Specification and guidelines for SCC*» Février2002.

[50] EFNARC, «*Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*», EFNARC, février 2002. Source :http://www.efnarc.org.

[51] RILEM, «*Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEMTechnical Committee 174-SCC*», Edited by A. Skarendahl and O. Petersso,
RILEM Publications, France, 2001.

[52] Arbelaez Jaramillo C.A,.Rigueira Victor J.W., Mrtivrgas J.R. Sera Ros P., Pinto Barbos M., *« Reduced models test for the characterization of the rheologicpropreties of self-compacting concret (SCC) »* , Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik,
Islande, pp. 240-250.2003.

[53] Hayakawa M., Matsuoka Y., Shindoh T., *"Development and application ofEFNARC, "Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete"*, EFNARC, février 2002. Source :http://www.efnarc.org.

[54] Efnarc *« Specification and guidelines for SCC»* Février2002, available on www.efnarc.org

[55] Jin J. and Domone P.L. «*Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component*» Proceedings of the first North American Conference on the design and use of Self-Consolidating Concrete, Centre for Advanced Cement Based Materials, North Western University, Chicago, November 2002, pp. 33-38.

[56] Chapdelaine F. *« Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais »*

Mémoire de Master (M.Sc.), 1998 Université de Laval, 126 pages.

[57] Couarraze, G. et Grossiord, J.L. *« Initiation à la rhéologie »* Lavoisier, Paris, 1983, 219 pages.

[58] Skarp U., Engstrand J., Jansson I., Bigley C.H., Omari M. and Wirje A. *A «new concept for improved rheological stability to allow reduction in cement content of self compacting concrete»* Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete, Japan in 2001, pp. 369-375.

[59] Shi and al., *« A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste »,* Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, vol 20, pp. 9-14.

[60] Wallevik J.E. *«Relationship between the Bingham parameters and slump»* Cement and Concrete Research, 2006, vol 36, pp. 1214–1221.

[61] Beaupré D. and Mindess S. *« Rheology of Fresh Concrete: Principles, Measurement, and Applications »* MateriaI Science of Concrete V edited by JSKALNY, S.MINDESS, 1998, pp. 149-190.

[62] Hwang S.D. and Khayat K.H. *« Effect of mix design on restrained shrinkage of self-consolidating concrete »* Materials and Structures, Published on line 27 March 2009

[63] BANFILL P.F.G. *« Workability of Flowing Concrete »* Magazine of Concrete Research, 1980, Vol.32, No. 110, March, pp.12-27.

[64] Jean-christopheBraquenier, «*Le Béton Autoplaçant ou Autocompactant* », Recherche et Etude, pp14-22, Automne 2000.

[65] P.Turcy, A.Loukili, « *Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants, Influence sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques*», Revue Française de Génie Civil. Volume 7- n° 4/2003, pp 425-450.

[66] Thierry Serdan, « *Les Béton Autonivelants (BAN) Synthèse Bibliographique*», Liaison Labo P et Ch 196, PP 53-60, Mars-Avril1995.

[67] Fiche technique édité par le centre d'information sur le ciment et ses applications : *« les constituant des bétons et des mortiers »*, Tome 1, Edition septembre 2005.

[68] NBN EN 1744-1, 1998 ? *« essais pour déterminer les propriétés chimique*

des granulats- partie 1 : analyse chimique » norme belge enregistrer, indice de classement : B 11.

[69] NF EN 933-1, 1997, « *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage* », AFNOR.

[70] NF EN 1097-6, 2001, « *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau* », AFNOR.

[71] NF EN 1097-3, 1998, « *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire* », AFNOR.

[72] NF EN 933-8, 1999, « *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable* », AFNOR.

[73] NF EN 1097-2, 2001, « *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2: Méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation* », AFNOR

[74] Aarre T. and Domone P. «*Reference concretes for evaluation of test methods for SCC*» Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland. 2003, pp. 495-505.

[75] Edamatsu Y., Nishida N. and Ouchi M. *A «rational mix-design method for selfcompacting concrete considering interaction between coarse and mortar particles»*, Proceedings of the First International RILEM Symposium on SelfCompacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp. 309-320.

[76] Daczko J.A. «*A comparison of passing ability test methods for Self-Consolidating Concrete*» 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik,Iceland, pp. 335-344.

[77] Safawi M.I., Iwaki I. and Miura T. *« A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete »* Cement and Concrete Research, 2005, vol 35, pp. 1834–1845.

ANNEXE A

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

A.1. Les Données

Pour un volume de béton de V=32litres (par exemple)

- Les masses volumiques :

> Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier Concassé) : ρ_G =1290kg/m^3

Masse volumique absolue du gravier (gravier coccacée) : *PA G* = 2500kg/m^3 > Masse volumique absolue du sable : P_S = 2580kg/m^3

Masse volumique absolue du ciment : P_C =3150kg/m^3

- Les coefficients d'absorption :

  > Coefficient d'absorption du sable : AbS = 1.2 > Coefficient d'absorption du sable : AbG = 2.18

- Le rapport gravie/sable : *G/S*= 0.85
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

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

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : *A*=1% du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de E/C_{volume} =0.4 par unité de volume de ciment et *E/Cpoids = E/Cvolum* / $\boldsymbol{\rho}_A$ = 0.45 par unité de poids de ciment.
- Le pourcentage de superplastifiant (**MEDAFLOW30**) :

% Sp = 1,6% du poids de ciment, le **MEDAFLOW30** est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau)

A.2. Calcul d'humidité

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

On prend un échantillon de sable de masse *M1* et un échantillon de gravier de masse $M'1$ et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6minutes pour le gravier et une durée de 8minutes pour le sable, puis on pèse *M2* et $M'2$ les masses respectives du gravier et du sable.

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

L'humidité du gravie $\mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} * 100$

A.3. Calcul des différents composants

A.3.1. Gravier

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

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

A.3.2. Sable

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

Le pourcentage du gravier *G* dans le béton :

$$\%G = \frac{G\left(\frac{Kg}{m^3}\right)}{\rho_{AG} \times 10}$$

Le pourcentage du volume de mortier *M* par rapport au volume de béton :

$$\% M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable *S* dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S/M}{100}$$

Quantité du sable *S* en (kg) pour un volume V de béton :

$$S\,(Kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000}\left(1 + \frac{\mu_s - A_{bs}}{100}\right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition

A.3.3. Ciment

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

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

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

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

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

$$C(Kg) = \%C \times \rho_c \times 10 \times \frac{V}{100}$$

A.3.4. Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton *Sp* (kg/m3)

$$Sp(Kg/m3) = (\%Sp)/100 \times \%C \times \rho_c \times 10$$

La quantité de superplatifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

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

A.3.5. Eau:

L'eau ajoutée au béton (*E*) est divisée en deux partie : la première partie (*E1*) est de 70% de (*E*) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (*E2*), elle de 30% de (*E*) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

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

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

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

L'eau contenue dans le sable : e_1

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

L'eau contenue dans le gravier : *e2*

$$e_{2(Kg)} = \frac{\%G/m^3 \times V}{1000}\left(\frac{\mu_G - A_{bG}}{100}\right)$$

L'eau contenu dans le superplastifaint : *e3*

$$e_3 = \frac{SP(Kg) \times 80}{100}$$

L'eau d'extraire

$e = e_1 + e_2 + e_3$

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

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

Avec :

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

Composition du Mélange de BAP						entrée des data cellules en rouge				
						valeurs calculées cellules en noir				
référence:						**Date** 17 Fev 2007				
						mesures d'humidité				
Densités relative		gravier	2.6		Absorptions (%)			Pds Hum	Pds sec	% Humid
		Sable	2.6		Gravier	1	*8/15*	261.2	255.1	2.39
		Ciment	3.15				*3/8*	205.84	200.03	2.90
		Fines	2.68		Sable	1.2	Sable	198.9	187.13	6.29
gravier										
Densité		1680	kg/m^3			% gravier	32.3	vol % de béton		
percent		50				Gravier	840	kg/m3		
8/15:3/8		2.00				*8/15*	*560*	*kg/m3*		
						3/8	*280*	*kg/m3*		
Air		1	vol % de béton							
Sable										
volume mortier		66.7	vol % de béton			% Sable	36.7	vol % de béton		
Sable		55	vol % de mortier			Sable	954	kg/m3		
Pate										
volume		30.0	vol % de béton			% Eau	16.6	vol % de béton		
E/P volume		1.233				Eau	166	kg/m3		
Poudre		13.4	vol % de béton							
Ciment		85	vol % de poudre			Ciment	11.4	vol % de béton		
Fines		15	vol % de poudre			Ciment	360	kg/m3		
Densité relative		3.08								
						% Fines	2.0	vol % de béton		
E/P Poids		**0.400**				Fines	54	kg/m3		
superplastifiant: MEDAFLOW 30										
Dosage		1.6	% liquid de poudre			superplas	t 6.62	kg/m3		
Mélange vol (litres		**40** litres								
Densité Béton		2380	kg/m3			Poids Mél	95.20	kg		
Poids Mélange										
	prop.mé	Pds		mé	absorptio	humidité	extra eau	Poids		
		kg/m3	kg	%	%	kg	kg			
Gravier 8/15		560	22.40	1	2.39	0.31	22.71			
Gravier 3/8		280	11.20	1	2.90	0.21	11.41			
Sable		954	38.15	1.2	6.29	1.94	40.09			
Ciment	CPA	360	14.39				14.39			
Fines	Laitier	54	2.16				2.16			
Eau		166	6.63							
Sup	MEDAF	6.62	0.26		80	0.21	0.265			
composition eau							3.95	eau 1	2.765	
								eau 2	1.185	
Total		2380	95.2			2.68	94.98			