

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Ecole Nationale Supérieure
des Travaux Publics
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme
de MASTER en TRAVAUX PUBLICS
Option : Matériaux & Structures

Thème

**INFLUENCE DES SUPERPLASTIFIANTS SUR
LE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUES ET
MECANIQUES DES BETONS AUTOPLACANTS**

Encadré par :

Pr MITICHE-KETTAB Ratiba

Présenté par :

ROUIBAH Mohammed Seddik

Promotion 2015

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

Remerciement

Toute ma gratitude et mes remerciements vont à ALLAH le tout puissant et miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Un grand remerciement au Pr MITICHE-KETTAB Ratiba, Chef de Département Génie Civil à l'École Nationale Polytechnique pour tous les efforts et patience qu'elle a fournis pour me faciliter et m'aider à accomplir ce travail.

Je voudrais remercier tout le personnel du laboratoire du génie civil de l'école nationale polytechnique.

Je remercie également le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Sans oublier tous mes amis et tous ceux qui ont contribués de près et de loin à l'aboutissement de ce modeste travail et tous les enseignants de l'ENSTP.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, grâce à leurs grands sacrifices ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

*Ma sœur **Asma** pour son encouragement et assistance et qu'elle n'a pas cessé de me porter.*

*Mon adorable nièce **Rana** pour le bonheur qu'elle apporte dans ma vie.*

*Ma sœur **Zina** et mon frère **Hamza** et toute la famille **ROUIBAH** et **REMOUM**.*

Tous mes amis et mes collègues.

الخرسانة ذاتية التوضع هي خرسانة كثيرة الميعة عند وضعها وذلك دون استعمال اهتزازات حيث توفر عدة مزايا بيئية بشرية تكنولوجية و اقتصادية تهتم القطاع الصناعي

الهدف من هذا البحث هو :

- صنع هذه الخرسانة الجديدة (الخرسانة آلية التوضع) من مواد محلية.
 - دراسة السلوكات الميكانيكية (خصائص الخرسانة ذاتية التوضع في الحالة السائلة و الصلبة).
 - تقديم معلومات عن تأثير مختلف العوامل المأخوذة في عين الاعتبار (النسبة ماء/إسمنت).
- الكلمات المفتاحية : الخرسانة ذاتية التوضع , الحالة السائلة , الحالة الصلبة , الخصائص , صيغة.

Résumé

Les bétons autoplaçant (BAP) sont des bétons très fluides dont la mise en place sans vibration présente plusieurs avantages, tant au niveau environnemental, humain, technologique qu'économique ; ils intéressent de plus en plus les industriels.

L'objectif de ce travail est :

- De Confectionner ce nouveau béton BAP à base des matériaux locaux.
- D'étudier le comportement rhéologique et mécanique (caractérisation à l'état frais et durci des bétons autoplaçant).
- De donner des informations sur l'influence des différents paramètres retenus (rapport eau/ciment ...etc.).

Mots clés : Béton auto plaçant, Etat frais, Etat durci, Caractéristiques, Formulation.

Abstract

Self-compacting concrete (SCC) are a very fluids concretes, put in place without vibration offers several advantages on both environmentally, human, technological and and economic which interest more and more manufacturers.

The objective of this study was to:

- Make this new concrete (SCC) based on local materials.
- Studying the mechanical behavior (characterization fresh and hardened self-compacting concrete).
- Provide information on the influence of various parameters (water/cement ratio.etc).

Keywords: Self compacting concrete, fresh state, hardened state, characteristics, Formulation.

Table des matières

REMERCIEMENT	I
DEDICACE	II
RESUME	III
TABLE DES MATIERES	IV
LISTES DES TABLEAUX	VIII
LISTES DES FIGURES	IX
LISTES DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS	XII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPIRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	4
1.1 INTRODUCTION.....	4
1.2 DEFINITION.....	4
1.3 DOMAINE D'EMPLOI.....	6
1.4 LES PARTICULARITES DES BETONS AUTO-PLAÇANT	6
1.4.1 <i>Un volume de pâte plus élevé</i>	7
1.4.2 <i>Une quantité de fine (diamètre < 80 µm) importante</i>	7
1.4.3 <i>L'emploi des superplastifiants</i>	7
1.4.4 <i>Un faible volume de gravillons d'un BAP</i>	8
1.5 LES DIFFERENTS CONSTITUANTS	8
1.5.1 <i>Les granulats</i>	8
1.5.2 <i>Le ciment</i>	9
1.5.3 <i>Les adjuvants</i>	10
1.5.3.1 <i>Les superplastifiants</i>	10
1.5.3.2 <i>Action d'un superplastifiant</i>	11
1.5.3.3 <i>Intérêt des superplastifiants</i>	13
1.5.3.4 <i>Comptabilité ciment/superplastifiant</i>	13
1.5.3.5 <i>Les différentes classes des superplastifiants</i>	13
1.5.4 <i>L'agent de viscosité</i>	14
1.5.5 <i>Les agents minéraux</i>	15
1.5.5.1 <i>Influence des additions</i>	15
1.5.5.2 <i>Les principaux ajouts et additions</i>	16
1.5.6 <i>Eau de gâchage</i>	18
1.6 LA FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS	19
1.6.1 <i>Principe des formulations des BAP</i>	20

1.6.2	<i>Les méthodes de formulation</i>	21
1.6.2.1	L'approche japonaise.....	21
1.6.2.2	Approche française.....	22
1.6.2.3	Approche suédoise	23
1.6.2.4	Approche basée sur un plan d'expérience	23
1.6.2.5	Approche basée sur l'optimisation du volume de la pâte	24
1.6.2.6	Approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE	24
1.7	EXIGENCES SUR SITE	25
1.7.1	<i>Fabrication</i>	25
1.7.2	<i>Transport du béton</i>	25
1.7.3	<i>Réception sur chantier</i>	26
1.7.4	<i>Mise en œuvre</i>	26
1.7.5	<i>Précautions pour l'emploi des BAP</i>	27
1.8	QUELQUES EXEMPLES DES STRUCTURES EN BETON AUTO PLAÇANT	28
1.9	CONCLUSION	29
CHAPIRE 2 : CARACTERISATION DES BAP		30
2.1	INTRODUCTION.....	30
2.2	PROPRIETES D'UN BETON AUTOPLAÇANT A L'ETAT FRAIS	30
2.3	LES ESSAIS DE CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS.....	31
2.3.1	<i>Essai de l'étalement</i>	31
2.3.2	<i>L'essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel »</i>	32
2.3.3	<i>Essai de stabilité au tamis</i>	33
2.3.4	<i>Essai à la boîte « THE BOX TEST »</i>	34
2.3.5	<i>Essai d'étalement modifié</i>	35
2.3.6	<i>Essai de la boîte</i>	36
2.3.7	<i>Essai de la boîte en U</i>	37
2.3.8	<i>L'essai de la passoire</i>	38
2.3.9	<i>Essai de capacité de remplissage « fillingcapacity »</i>	39
2.3.10	<i>Essai de ressuage</i>	41
2.3.11	<i>Essais complémentaires sur béton frais</i>	41
2.3.11.1	Mesure de la teneur en air occlus	41
2.3.11.2	La masse volumique	42
2.4	PROPRIETES MECANIQUE DU BAP A L'ETAT DURCI	43
2.4.1	<i>Résistance à la compression</i>	43
2.4.2	<i>Résistance à la traction</i>	44
2.4.3	<i>Module l'élasticité</i>	44
2.5	CONCLUSION	45
CHAPIRE 3 : PROGRAMME EXPERIMENTAL.....		46

3.1	INTRODUCTION.....	46
3.2	CARACTERISATION DES MATERIAUX	46
3.2.1	<i>Les granulats</i>	46
3.2.1.1	Echantillonnage (NF P18-553)	46
3.2.1.2	Analyse granulométrique	47
3.2.1.3	Masses volumiques absolue et apparente : NF P 18-554 et NF P 18-555.....	48
3.2.1.4	Coefficient Los Angeles (NF P 18-573).....	51
3.2.1.5	Module de finesse : (NF P18-304)	51
3.2.1.6	Equivalent de sable (NF P18-598).....	52
3.2.2	<i>Le ciment</i>	53
3.2.3	<i>Les adjuvants</i>	54
3.2.3.1	MEDA FLOW 30	54
3.2.3.2	MEDA FLUID SF 150	55
3.2.4	<i>Eau de gâchage</i>	55
3.3	ELABORATION DES BAP	55
3.3.1	<i>Présentation de la méthode Japonaise d'Okamura et al.</i>	56
3.3.2	<i>Formulation de la variété des BAP étudiés</i>	56
3.3.2.1	Détermination de dosage des différents constituants	57
3.3.3	<i>Mode opératoire</i>	58
3.3.3.1	Eprouvette cylindriques 16 X 32 cm ²	59
3.3.3.2	Conservation des éprouvettes.....	60
3.4	CARACTERISATION DES BETONS ELABORES.....	60
3.4.1	<i>Caractérisation à l'état frais</i>	60
3.4.1.1	Essai d'étalement	60
3.4.1.2	Essai de stabilité au tamis.....	61
3.4.2	<i>Caractérisation du mélange à l'état durci</i>	61
3.5	CONCLUSION	63
CHAPIRE 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....		64
4.1	INTRODUCTION.....	64
4.2	LES RESULTATS D'ESSAI SUR LES BETONS FRAIS	64
4.2.1	<i>L'essai à cône d'Abrams</i>	64
4.2.2	<i>L'essai de stabilité au tamis</i>	65
4.2.3	<i>Essai de la résistance à la compression</i>	65
4.2.4	<i>Récapitulatif des résultats</i>	65
4.2.5	<i>Observations visuelles</i>	66
4.3	INTERPRETATIONS	66
4.3.1	<i>Caractérisation rhéologiques</i>	66
4.3.1.1	Effet de la présence et du dosage de superplastifiant.....	66
4.3.1.2	Effet de type de superplastifiant	67

4.3.1.3	Effet de la quantité d'eau	68
4.3.2	<i>Propriétés mécaniques</i>	68
4.3.2.1	Effet de type et de dosage de superplastifiant:.....	68
4.3.2.2	Effet de la quantité d'eau	68
4.4	CONCLUSION	69
CONCLUSION GENERALE		70
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		72
LISTE DES NORMES		77
ANNEXES ET FICHES TECHNIQUES		78

Listes des tableaux

Tableau 1.1: Les résistances mécaniques des ciments courants (20).....	10
Tableau 2.1: Critères d'acceptabilité d'une formulation d'un BAP.	34
Tableau 2.2 : Espacement et nombre d'armatures de l'essai de la boîte en L (20).	36
Tableau 3.1 : L'analyse granulométrique du gravier.	48
Tableau 3.2 : L'analyse granulométrique du sable.....	48
Tableau 3.3 : Masses volumiques apparente des granulats.	50
Tableau 3.4 : Masses volumiques absolue des granulats.	51
Tableau 3.5 : Résultat de l'essai de LA.....	51
Tableau 3.6 : Le module de finesse.....	52
Tableau 3.7 : Résultat de l'essai ES.	53
Tableau 3.8 : Les caractéristiques du MEDAFLOW 30.	54
Tableau 3.9 : Les caractéristiques du MEDA FLUID SF 150.	55
Tableau 3.10 : Dosage des différents constituants pour un rapport E/C=0.4.....	57
Tableau 3.11 : Dosage des différents constituants pour un rapport E/C=0.35.....	57
Tableau 4.1 : Tableau des résultats d'essai à cône d'Abrams.	64
Tableau 4.2 : Résultats d'essai de stabilité au tamis.	65
Tableau 4.3 : Résultats d'essai de la résistance à la compression.....	65
Tableau 4.4 : Récapitulatif des résultats.....	66

Listes des figures

Figure 1.1: Composition d'un BO et d'un BAP (9).	5
Figure 1.2 : Effet des superplastifiants (9).	11
Figure 1.3 : Action des superplastifiants-défloculation des grains de ciment (23).	12
Figure 1.4 : Effet du superplastifiant.....	12
Figure 1.5 : Influence des agents de viscosité et des superplastifiants sur l'ouvrabilité des BAP (27).	14
Figure 1.6 : Les fillers calcaires.	16
Figure 1.7 : Les cendres volantes.	17
Figure 1.8 : Le laitier.....	17
Figure 1.9 : La fumée de silice.....	18
Figure 1.10 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité (40).....	22
Figure 2.1 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (50).	32
Figure 2.2 : Essai de l'entonnoir en forme de V (50).....	33
Figure 2.3 : Essai de stabilité au tamis (51).	34
Figure 2.4 : Essai du "Box test" (29).....	35
Figure 2.5 : Phénomène de blocage (28).....	35
Figure 2.6 : Essai d'étalement modifié (52).....	36
Figure 2.7 : Schéma de principe de l'essai de la boîte en L (23).....	37
Figure 2.8 : le "U-shaped apparatus test method " (28).	37
Figure 2.9 : Schématisation de la facilité de remplissage (30).....	38
Figure 2.10 : L'essai du U (30).....	38

Figure 2.11 : L'essai de la passoire (54) (2).	39
Figure 2.12 : Essai de la capacité de remplissage "Essai du caisson" (20).	40
Figure 2.13 : Essai du caisson (55).	40
Figure 2.14 : Essai de ressuage (56).	41
Figure 2.15 : Aéromètre pour la mesure de l'air occlus (45).	42
Figure 2.16 : Mesure de la masse volumique réelle (45).	42
Figure 2.17 : Mesure de la résistance à la compression des éprouvettes 16 x 32 cm (51).	43
Figure 2.18 : Schématisation de l'essai de traction par flexion (51).	44
Figure 2.19 : Comparaison des modules élastiques théoriques des BAP et de bétons vibrés avec leur valeurs expérimentales (53).	45
Figure 3.1: L'appareil d'échantillonnage.	47
Figure 3.2 : Tamis d'analyse granulométrique.	47
Figure 3.3 : Mesure de la masse volumique apparente.	49
Figure 3.4 : Mesure de la masse volumique absolue.	50
Figure 3.5 : Essai Los Angeles.	51
Figure 3.6 : Essai équivalent de sable.	53
Figure 3.7 : Le ciment utilisé	53
Figure 3.8 : Le superplastifiant MEDA FLOW 30.	54
Figure 3.9 : Le superplastifiant MEDA FLUID SF 150.	55
Figure 3.10 : Le malaxeur utilisé avec une capacité de 1/20 ème m ³	59
Figure 3.11 : L'éprouvette normalisée 16 x 32 cm ² conformément à la norme NF P 18-406.	59
Figure 3.12 : L'essai d'étalement.	60
Figure 3.13 : Essai de stabilité au tamis	61

Figure 3.14 : Eprouvette avant le démoulage.....	62
Figure 3.15 : Eprouvette après le démoulage.....	62

Listes des symboles et des abréviations

AFGC	Association Française de Génie Civil
BAP	Béton Auto-Plaçant
SCC	Self Compacting Concrete
BO	Béton Ordinaire
BAN	Béton Auto-Nivelant
BV	Béton Vibré
BHP	Béton à Hautes Performances
ENG	Entreprise Nationale des Granulats
MEDA FLOW 30 (S1)	Superplastifiant (Société Granitex)
MEDA FLUID SF150 (S2)	Superplastifiant (Société Granitex)
M _f	Module de finesse
LA	Coefficient Los Angeles
ES	Equivalent de sable
C	Dosage en ciment
E	Dosage en eau
G	Dosage du gravier
S	Dosage de sable
A	Le volume d'Air Occlus
G/S	Rapport massique gravier sur sable
E/L	Rapport massique eau sur liant
E/C	Rapport massique eau sur ciment
SP	Dosage de superplastifiant
BAP 1 à BAP 7	Béton Auto-Plaçant
MBE	Mortier du Béton Equivalent
PMS	Les Polycondensats de formaldéhyde et de Mélamine Sulfonée
PNS	Les polycondensats de formaldéhyde et de Naphtalène Sulfoné
MLS	Les lignosulfonates modifiés
SF	Slump Flow
T ₅₀	Le temps nécessaire pour atteindre un diamètre de 500 mm.
LCPC	Laboratoire Centrale des Ponts et des Chaussés

M	La masse du récipient plein de béton
M_0	La masse du récipient vide
M_{VR}	La masse volumique réelle du béton frais
V	Le volume du récipient utilisé
M_V	La masse volumique théorique
R_c	La charge de rupture
L	La portée
I	L'inertie de flexion
F_{max}	La charge maximale (en N)
A_c	La section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée (en mm^2)
D_{MAX}	Diamètre maximal des granulats.
μ	La masse volumique
Π	La laitance

Introduction générale

L'idée du développement d'un béton très fluide qui ne nécessite pas lors de sa fabrication et sa mise en place des systèmes de vibration a été lancée en premier lieu par des chercheurs de l'université de Tokyo vers 1980. Leur objectif était de supprimer les opérations coûteuses liées à la vibration, et le ressuage afin d'accroître la productivité du chantier. Ces bétons sont connus sous la dénomination « BAP » Béton Auto-Plaçant ou « SCC » Self Compacting Concrete. Depuis, leur utilisation ne cesse de s'étendre en Europe et sur le continent nord-américain en raison d'aspect économique (1).

Les grands groupes industriels japonais (Taisei, Kajima, OBayashi. etc.) ont commercialisé les BAP vu les intérêts technico-économiques qu'ils présentent :

- Une diminution du temps du personnel lors de la mise en place du béton en chantier.
- L'obtention d'une meilleure qualité du béton, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation.

Certains facteurs peuvent constituer un frein quant à une grande diffusion des BAP :

- Le BAP exerce une poussée sur les coffrages plus importante qu'un béton classique. Les coffrages doivent être dimensionnés et conçus pour résister à ces contraintes mécaniques auxquelles s'ajoutent des conditions d'étanchéités structurales. Ceci entraîne un coût supplémentaire d'équipement. En plus, l'utilisation des BAP implique un choix rigoureux de type d'huiles ou de cires de décoffrage afin de limiter les risques de défaut de parement.
- Le BAP exige l'utilisation d'adjuvants, de fines et un dosage en ciment plus élevé. Il coûte donc plus cher qu'un béton courant à résistance mécanique équivalente.
- Le BAP est de formulation critique. Cela signifie qu'il perd sa qualification de BAP à la moindre variation du dosage des différents constituants. Il doit donc faire l'objet d'un contrôle permanent à la production.

Les premières études effectuées sur les BAP visaient essentiellement à mettre au point des formulations qui répondent à des exigences de fluidité. De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des formulations appropriées aux BAP. Les compositions tirées de la littérature (2) (3) , soulignent que les BAP contiennent un volume des fines plus important que les bétons classiques et incorporent des adjuvants. Le volume de pâte dans les BAP est

plus élevé que dans les bétons classiques typiquement entre 330 et 400 l/m³ et la taille maximale des granulats est limitée à 20 millimètres (4), (5). Cependant on retrouve dans la littérature des BAP contenant des granulats de $D_{\max}=25$ mm (6).

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires (BO) principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés a priori contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité). L'Association Française du Génie Civil (AFGC) définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons « très fluides, homogènes et stables » (7).

L'objectif de ce travail est multiple :

Maitriser la conception des BAP qui consiste à préciser les connaissances relatives à la caractérisation à l'état frais et durci de ce type de béton.

Une étude comparative est faite entre les résultats obtenus des BAP et d'un béton ordinaire.

Donner des informations sur l'influence des différents paramètres retenus (dosage de superplastifiant, type de superplastifiant, le rapport eau/ciment) sur les caractéristiques du BAP.

Le mémoire s'articule en deux grandes parties :

La première partie à dominante bibliographique, se compose en deux chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique dans laquelle on présente un état de l'art de ce nouveau matériau.

Le deuxième chapitre présente une analyse du comportement du matériau béton autoplaçant : la caractérisation classique à l'état frais et durci.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale et les résultats, elle est structurée comme suit :

Au troisième chapitre on s'intéresse à la présentation de notre programme expérimental.

Le dernier chapitre présente des principaux résultats obtenus et leurs discussions.

Pour clôturer, nous avons résumé l'ensemble des résultats de ce travail et recommandé les actions à prendre comme des pistes de recherche dans la conclusion générale.

Chapire 1 : Etude bibliographique

1.1 Introduction

Les bétons auto-compactants de l'anglais Self Compacting Concrete (S.C.C.) marquent une nouvelle étape dans la technologie des bétons ; leur atout : Une mise en œuvre facile qui engendre toute une chaîne d'avantages.

Le béton auto-compactant est également dénommé béton auto-plaçant pour les parois verticales, ou encore auto-nivelant pour les parois horizontales (8).

L'appellation la plus courante en Algérie est : béton auto-plaçant notée BAP

1.2 Définition

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité). L'association française de génie civil (AFGC) définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons « très fluides, homogènes et stables » (4).

La mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une grande fluidité du matériau, mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiant et de fines et /ou l'emploi d'agents de viscosité.

Un BAP doit être assez fluide pour pouvoir être mis en place avec un débit suffisant et remplir les coffrages sans apport de vibration sous l'effet de son poids propre tout en restant homogène. Cependant, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle (par exemple, une armature de ferrailage), les gravillons ont tendance à venir en contact pour former des voutes solides qui bloquent l'écoulement. C'est ce que l'on appelle le risque de blocage. Ainsi, le béton doit présenter une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement y compris au droit des armatures (ségrégation dynamique). Un béton autoplaçant doit aussi avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise et rester homogène afin de satisfaire aux propriétés mécaniques souhaitées. Ainsi la difficulté du cahier des charges d'un BAP est la recherche d'un

compromis satisfaisant entre une grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation aussi bien au repos qu'en écoulement.

Les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (Figure 1.1).

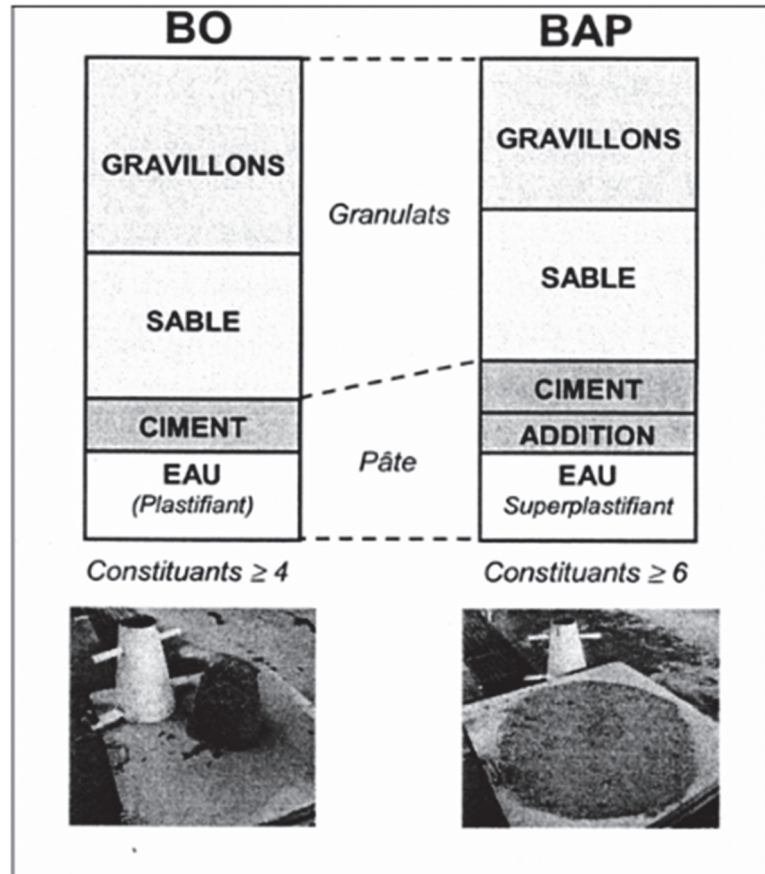


Figure 1.1: Composition d'un BO et d'un BAP (9).

Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement.

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant (superplastifiant), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée.

La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés

de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats. Cela étant, en pratique leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils entraînent un surcoût, qui s'ajoute aux surcoûts dus aux superplastifiants et aux additions.

Evidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais (10).

1.3 Domaine d'emploi

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité (11) :

- Possibilité de coulage de zones fortement ferraillées.
- Possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles

L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de formes complexes.

- Obtention de très bonnes qualités de parement.

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

1.4 Les particularités des bétons auto-plaçant

Malgré les différentes méthodes de formulations existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre (12).

D'après (2), (10), (11), (12) Ces caractéristiques sont :

- Une grande proportion en fines,
- Un volume de pâte important.

- Des ajouts de superplastifiant et de rétenteurs d'eau (agent de viscosité).
- Un faible volume en gravillons.

1.4.1 Un volume de pâte plus élevé

Les formules des BAP actuellement réalisées se caractérisent par un fort dosage en liant. En effet, ces bétons ont souvent des teneurs en liant supérieures à 400 kg/m³ (13). De plus, les chercheurs ont montré l'intérêt d'utiliser des fortes teneurs en additions minérales (laitiers, cendres volantes, fumées de silice, additions calcaires .etc.) afin d'obtenir à la fois une grande fluidité et une bonne stabilité du béton (14).

Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de la pâte (ciment + addition + adjuvants + eau efficace + air) important, typiquement de 330 à 400 l/m³. dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres. Le volume de la pâte dans un BAP représente 35 à 45 % du volume total, alors que dans un béton ordinaire (BO) il est de 20 à 35% (5), et qu'un superplastifiant est employé pour fluidifier la pâte.

1.4.2 Une quantité de fine (diamètre < 80 µm) importante

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé).

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc.) et leur proportion respective.

1.4.3 L'emploi des superplastifiants

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (généralement proche du dosage de saturation).

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

Quelquefois, on emploie simultanément les superplastifiants avec un agent de viscosité qui sont généralement des dérivés celluloses, des polysaccharides,... Ils interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci.

1.4.4 Un faible volume de gravillons d'un BAP

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

1.5 Les différents constituants

1.5.1 Les granulats

Les granulats sont un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives.

Les granulats sont définis par la norme P18-101 comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation, de base et de roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées (13).

DOMONE a fait une synthèse des travaux réalisés sur les 11 dernières années en donnant les principales compositions utilisées pour 51 applications industriels ; il en ressort que le diamètre maximal des gravillons est compris entre 10 et 20 mm (1).

Le choix d'un D_{max} plus important est possible mais ne se justifie que lorsque le confinement est faible.

Les granulats sont solidarités par le ciment. Ce mélange qui se compose de diverses classes granulaires, constitue le squelette granulaire du béton et doit comporter le moins de vides possibles. Par rapport à la pâte de ciment qui les enrobe, les granulats de bonne qualité offrent les avantages suivants :

- Résistance en général plus élevée.
- Meilleure durabilité.
- Absorption d'une partie de la chaleur d'hydratation, d'où un effet régulateur sur le processus de prise.

Les caractéristiques principales des granulats pour les bétons sont :

- Caractéristiques géométriques (granularité, teneur en fines, forme) (15) (16) .
- Les caractéristiques physiques (Los Angeles, Micro Deval, masse volumique, absorption d'eau) (15) (17).
- Propreté (18).

1.5.2 Le ciment

Selon la norme NF EN 197-1 : « Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau » (19).

Les ciments les plus courants dans le monde du génie civil sont les ciments à base clinker Portland, produit obtenue par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile (9).

Les principaux constituants du ciment portland sont :

Le silicate bicalcique (C2S).....	2CaOSiO ₂
Le silicate tricalcique(C3S).....	3CaOSiO ₂
L'aluminate tricalcique(C3A).....	3CaOAl ₂ Fe ₂ O ₃
Le ferroaluminatetetracalcique(C4AF)	4CaOAl ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression en MPa à 28 jours (17) (13).

La norme NF EN 197-1 spécifie une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont représentées dans le tableau (20) :

Tableau 1.1: Les résistances mécaniques des ciments courants (20).

Classe des ciments	Résistance à 2 jours (Mpa)	Résistance minimale à 28 jours (Mpa)	Résistance maximale à 28 jours (Mpa)
32.5	/	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 R	≥ 13.5	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5	≥ 12.5		
42.5 R	≥ 20	≥ 52.5	/
52.5	≥ 20		
52.5 R	≥ 30		

Du point de vue rhéologique, les propriétés du ciment influant sur l'écoulement de la pâte d'un béton sont principalement la composition minéralogique, la granulométrie et la finesse. (21).

1.5.3 Les adjuvants

Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques qui sont incorporés dans les bétons à des doses précises du poids de ciment et selon leur plage d'utilisation indiquée par le fournisseur. Leur introduction dans le mélange engendre des phénomènes physico-chimiques très complexes et ils ont pour but d'améliorer les propriétés des bétons à l'état frais ou à l'état durci (18).

1.5.3.1 Les superplastifiants

Un superplastifiant est un adjuvant qui peut être introduit dans un béton, un mortier ou un coulis, et qui permet de réduire le dosage en eau et d'ajuster sa fluidité (augmenter l'affaissement au cône d'Abrams), ceci entraîne une augmentation de la résistance mécanique (22).

Leur utilisation doit toujours s'accompagner d'un réglage soigné de la répartition des fines particules du béton. L'effet de ces superplastifiants peut être décrit comme suit :

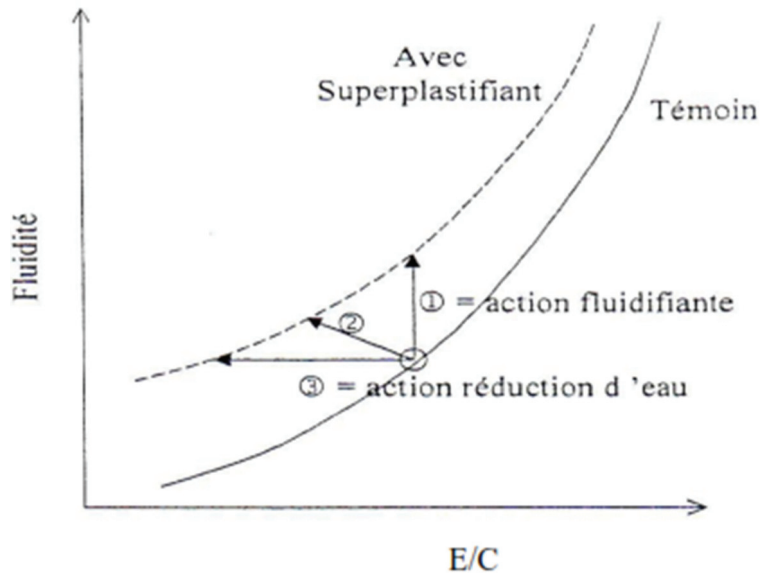


Figure 1.2 : Effet des superplastifiants (9).

- Pour un rapport E/C constant, les superplastifiants améliorent l'ouvrabilité du béton (cas 1). Ce mode d'action est recherché pour les applications courantes du béton prêt à l'emploi, pour prolonger les temps d'ouvrabilité. Le confort d'utilisation, et donc la qualité des réalisations sont grandement améliorés quand le superplastifiant est ainsi utilisé.
- A ouvrabilité constante, les superplastifiants permettent de réduire l'eau nécessaire, donc le rapport E/C (cas 2). Les superplastifiants permettent une réduction de ce rapport d'au moins 12%. Il en résulte un accroissement des résistances, de la compacité et de la durabilité des bétons.
- Dans la pratique, c'est une action combinée (cas 3) qui est obtenue, plus ou moins prononcée dans un sens ou dans l'autre.

1.5.3.2 Action d'un superplastifiant

L'apparition des bétons autoplaçant et des bétons à hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants SP (23). L'action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et /ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floes est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure 1.3). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles (24).

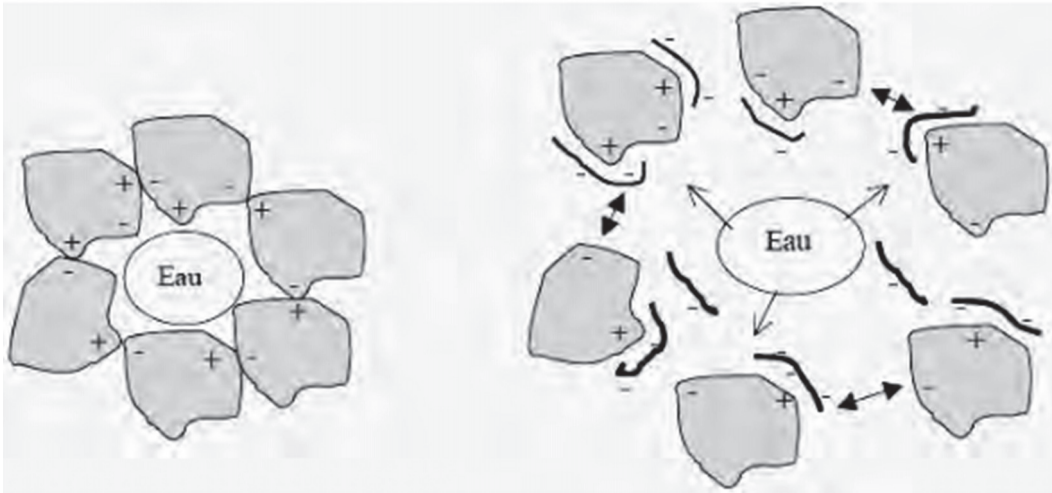


Figure 1.3 : Action des superplastifiants-défloculation des grains de ciment (23).

L'ajout d'un superplastifiant aide à augmenter la fluidité. La figure 1.4 montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiant (23).

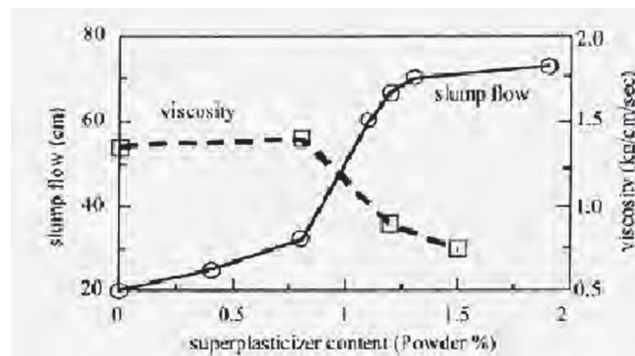


Figure 1.4 : Effet du superplastifiant (23).

Sugamata et al ont étudié différents superplastifiants et différents dosages sur le maintien rhéologique dans le temps d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage de superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur.

Cette caractéristique est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange. Actuellement, les superplastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation (25).

Les BAP contiennent des superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation) (26) peut

augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

1.5.3.3 Intérêt des superplastifiants

L'intérêt des superplastifiants se retrouve dans l'optimisation des facteurs coût, ouvrabilité et caractéristiques finales du béton. Les superplastifiants sont devenus incontournables dans la réalisation des nouveaux bétons hautes performances (BHP), mais aussi dans la réalisation des bétons autoplaçants (BAP) ou des bétons autonivelants (BAN).

Comme effet secondaire des superplastifiants, il faut signaler un ralentissement de la prise en cas de trop fort dosage, et des difficultés parfois à régler le pourcentage d'air entraîné en combinaison avec les entraîneurs d'air.

Il est important de vérifier la bonne compatibilité entre les ciments (et dans une moindre mesure, les granulats) et ces types d'adjuvant, surtout en cas de dosage élevé ou alors de l'utilisation simultanée de plusieurs adjuvants (16).

1.5.3.4 Comptabilité ciment/superplastifiant

La réaction du superplastifiant avec le ciment peut entraîner certains désagréments.

D'après Aïtcin et al, certaines combinaisons ciment-superplastifiant sont dites compatibles c'est à dire qu'on peut fabriquer un béton ayant un grand affaissement initial qui se conserve dans le temps (de la fabrication jusqu'à la mise en place du béton sur chantier) alors que d'autres combinaisons sont incompatibles, c'est à dire que l'affaissement initial élevé obtenu à l'aide du superplastifiant est rapidement perdu. Il est donc nécessaire de vérifier rapidement la compatibilité entre un superplastifiant et un ciment donné (16).

1.5.3.5 Les différentes classes des superplastifiants

Les superplastifiants sont des poly-électrolytes organiques, appartenant à la catégorie de dispersantes polymériques. Les superplastifiants sont généralement classés en quatre groupes:

Les polycondensats de formaldéhyde et de mélamine sulfonée (PMS), les polycondensats de formaldéhyde et de naphthalène sulfoné(PNS), les lignosulfonates modifiés(MLS) et les autres incluant les esters d'acides sulfoniques, les polyacrylates et les polycarboxylates (16).

1.5.4 L'agent de viscosité

Généralement les superplastifiants, par leur rôle de fluidifiant diminuent la viscosité du béton frais ce qui le rend moins stable vis-à-vis de la ségrégation, c'est pour cela que les agents de viscosité sont utilisés.

Ces produits ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. Ces agents colloïdaux améliorent la viscosité et diminuent la ségrégation et le ressuage dans les bétons, par contre ils augmentent la demande en eau du mélange et nécessitent leur utilisation en présence de superplastifiants (13).

A.Ghezal (27) a utilisé des BAP de 450 kg/m^3 et de 570 kg/m^3 de liant avec différents dosages en superplastifiant et différents dosage en agent colloïdal (gomme de Welan), et un rapport E/L qui varie entre 0,42 et 0,45. L'auteur remarque que l'étalement diminue avec l'augmentation du dosage en agent de viscosité et il a constaté que quatre facteurs principaux sont capables d'entraîner un effet très significatif : le dosage en liant, le rapport E/L, le dosage en superplastifiant et le dosage en gomme de Welan. Les résultats ont donné l'histogramme présenté dans la figure I.5.

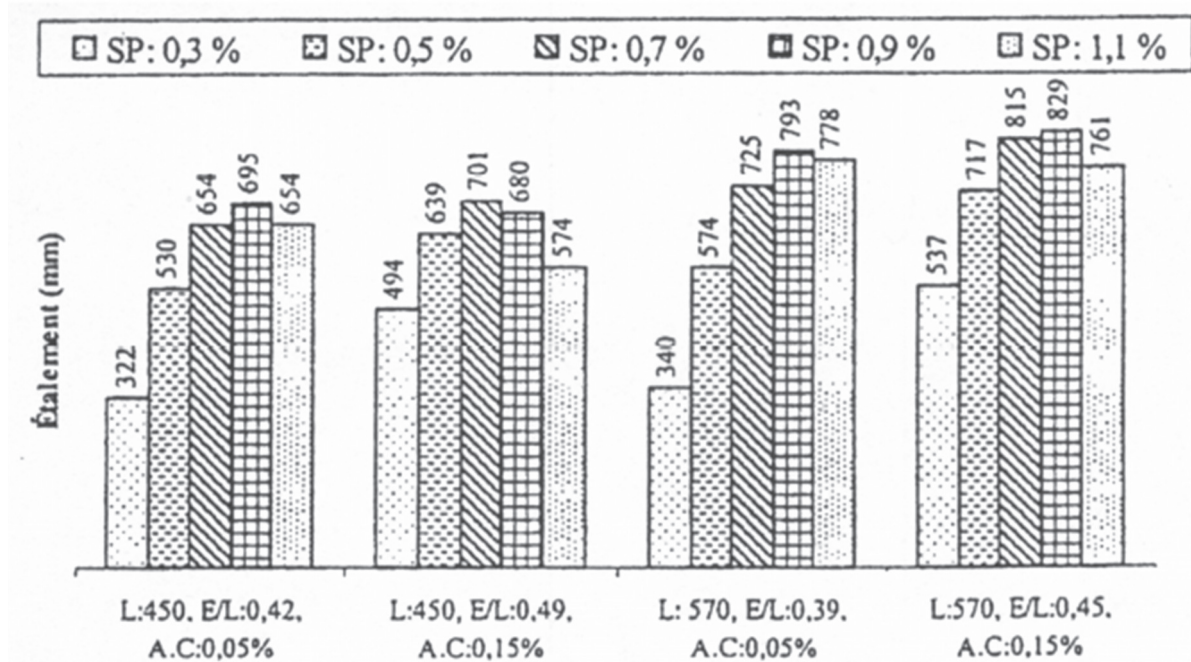


Figure 1.5 : Influence des agents de viscosité et des superplastifiants sur l'ouvrabilité des BAP (27).

1.5.5 Les agents minéraux

Les additions et ajouts sont des substances qui améliorent certaines propriétés du béton telles que l'ouvrabilité du béton frais, la résistance et la compacité du béton durci, ou lui confèrent certaines propriétés particulières telles que la teinte (28).

Contrairement aux adjuvants, les quantités d'ajout incorporées au béton sont suffisamment importantes pour être prises en considération dans le calcul volumique.

La norme NBN EN206-1 définit les additions comme des matériaux minéraux finement divisés. On peut déterminer en conformité avec la norme NBN EN206-1 le dosage de l'addition et éventuellement adapter les formulations aux exigences requises pour certaines parties d'ouvrage. Cet avantage ne va cependant pas sans quelques inconvénients :

- Le stockage séparé des additions et ajouts demande des silos, des équipements de dosage et des contrôles supplémentaires.
- Certains ajouts ont tendance à former des grumeaux d'un stockage prolongé.

1.5.5.1 Influence des additions

L'utilisation des additions minérales est intéressante sur le plan rhéologique car ils sont d'une part moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet aussi d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton. Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton. D'autre part, le grand volume d'additions minérales utilisées dans les bétons autoplaçants pour remplacer une partie du ciment contribue à la réduction de la chaleur d'hydratation et du retrait du béton. En général, une matière pouzzolanique tel que la cendre volante améliore la déformabilité du béton (particules sphériques et lisses), le laitier est supposé d'améliorer la résistance et la maniabilité (particules vitreuses). La fumée de silice augmente la résistance à la séparation des constituants du béton et réduit significativement les phénomènes de ressuage et de ségrégation (29).

Généralement les BAP contiennent une quantité de ciment et de fines de l'ordre de 500 kg/m^3 de dimension inférieure à 80 micromètre. Les additions utilisées sont en général des cendres volantes, fumées de silice, laitier de haut fourneau ou les fillers calcaires (30).

1.5.5.2 Les principaux ajouts et additions

Les fillers calcaires : ce sont des produits secs, finement divisés, issus de la taille, du sciage ou du travail de la roche naturelle calcaire (31).



Figure 1.6 : Les fillers calcaires.

Ce sont principalement des sous-produits générés :

- Dans l'industrie de la chaux.
- Lors de l'extraction de granulats calcaires.
- Dans l'industrie de la pierre ornementale (32).

L'ajout de filler calcaire donne au ciment une bonne capacité de rétention d'eau, ce qui réduit les risques de ségrégation et favorise le compactage du béton et donc sa durabilité.

Ces fillers sont également utilisés pour confectionner des bétons autonivelants (BAN) ou des bétons autoplaçants (BAP). Dans ce cas, leur utilisation permet d'augmenter la quantité de pâte nécessaire pour obtenir un écoulement des bétons sans vibration (28).

Les cendres volantes : l'ajout cimentaire le plus fréquemment utilisée dans le béton, est un résidu finement divisé (poudre ressemblant au ciment) résultant de la combustion du charbon pulvérisé et évacué de la chambre de combustion d'un four par les gaz qui s'en échappent. Les cendres volantes doivent être conformes à la norme NF EN 450 «Cendres volantes pour béton. Définitions, exigences et contrôle de qualité».

La plupart des cendres volantes sur le marché sont un sous-produit des centrales thermiques (28).



Figure 1.7 : Les cendres volantes.

Le laitier : selon la norme NF P 18-506 «Additions pour béton hydraulique. Laitier vitrifié moulu de haut fourneau» ; « Le laitier provient du laitier vitrifié (granulé ou bouleté), coproduit de la fabrication de la fonte, obtenu par trempe du laitier de haut fourneau en fusion » (13). Le laitier en fusion à une température d'environ 1500 °C, est refroidi rapidement en le trempant dans l'eau pour former un matériau granuleux ressemblant à un sable vitreux. Le matériau granulé, broyé à une taille de moins de 45 microns, possède une finesse Blaine d'environ 400 à 600 m²/kg. La densité d'un laitier de haut fourneau granulé broyé est comprise entre 2.85 à 2.95. La masse volumique des laitiers varie de 1050 à 1375 kg/m³ (15).



Figure 1.8 : Le laitier.

Les ciments contenant du laitier ont une montée en résistance d'autant plus lente que leur teneur en laitier est élevée. Ils demandent généralement un allongement du temps de coffrage et une durée de cure plus importante.

Ils ont néanmoins des qualités qui les rendent intéressants dans plusieurs domaines d'applications :

- Chaleur d'hydratation réduite.
- Structure compacte de la pâte de ciment conférant au béton une bonne résistance aux eaux douces, à l'eau de mer, aux eaux sulfatées et à la pénétration des ions chlorures.
- Diminution du risque d'efflorescences (pour des teneurs élevées en laitier).
- Bon maintien d'ouvrabilité.
- Résistance mécanique très élevée à longue échéance.
- Réduit les risques de réactions alcalis-granulats.
- Teinte claire.

La fumée de silice : selon la norme NF P 18-502 « fumées de silice » : il s'agit de Poudre amorphe divisée résultant de la production d'alliages de silicium. Elle est entraînée par les gaz, depuis la zone de combustion des fours, vers le système de captage (33).

La fumée de silice est vendue sous forme de poudre mais est plus souvent disponible sous forme de liquide. La fumée de silice est utilisée selon un dosage correspondant entre 5% et 10% de la masse totale des matériaux cimentaires.



Figure 1.9 : La fumée de silice.

Elle est utilisée dans les applications où un niveau élevé d'imperméabilité est requis et dans le béton à haute résistance. Lorsque le béton doit résister aux sels de déglacage, la quantité maximum de fumée de silice devrait être de 10 % de la masse des matériaux cimentaires (34).

1.5.6 Eau de gâchage

L'eau joue un double rôle dans la technologie du béton. D'une part, elle permet l'hydratation du ciment et d'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité et un bon compactage de béton.

On entend par eau totale, la totalité de l'eau contenue dans le béton frais.

L'eau sera efficace quand il comprend seulement :

- L'eau de gâchage ajoutée au mélange.
- L'eau contenue à la surface des granulats.
- Suivant le cas, l'eau apportée par les adjuvants ou les ajouts.

L'eau totale comprend donc l'eau efficace plus l'eau contenue dans les granulats (eau d'absorption), qui n'est pas disponible pour mouiller le mélange et ainsi participer à son ouvrabilité et à l'hydratation du ciment. Pour cette raison, c'est la valeur d'eau efficace qui est utilisée pour le calcul du facteur eau/ciment (18).

Exigence concernant l'eau de gâchage

L'eau courante peut être utilisée pour le gâchage, pour autant qu'elle ne contienne pas en quantités appréciables des substances susceptibles de réagir avec le béton. Ces substances peuvent induire en particulier (18) :

- Une accélération ou un ralentissement de la prise et du durcissement (par exemple ; sucre, acides humiques).
- Un entrainement excessif d'air non contrôlé, d'où la perte de résistance (par exemple : micro-organismes, huiles, suspensions, certains sels minéraux).
- La corrosion des armatures.

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 (10).

La mise au point d'une formule de BAP est très complexe, parce que, d'abord les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais, il faut réaliser en plus un essai de cône, l'essai à la boîte en L et l'essai de stabilité au tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide et très sensible à la ségrégation (35).

Avec le temps, et le retour d'expérience, certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés (11) (10) :

- Un volume de gravillons limité. Le rapport G/S est de l'ordre de 1 voire un peu inférieur selon le module de finesse du sable.
- Un diamètre du plus gros granulat plus faible que dans le cas des bétons classiques. La quasi-totalité des BAP sont confectionnés avec un granulat de D_{\max} de 20 mm.
- Un volume de pâte variant entre 330 et 400 l/m³.
- Une quantité de ciment comprise entre 350 et 450 kg/m³ selon les exigences requises à l'égard de la résistance en compression à court et à moyen terme. La masse d'addition varie de 120 à 200 kg/m³, la quantité d'eau varie de 170 à 210 l/m³.
- L'emploi d'un superplastifiant pour atteindre la fluidité souhaitée. Les superplastifiants permettent l'obtention de bétons fortement fluidifiés avec des réductions d'eau de plus de 20 % à des dosages modérés. Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La mise au point de la formule passe par l'optimisation du système quantité de fines, rapport Eau/liant et du dosage en superplastifiant de façon à atteindre à la fois la viscosité et la déformabilité de la pâte requises (36).

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception sur le papier. La formule ne peut être optimisée et vérifiée que par les essais effectués la plupart du temps directement sur le béton (37).

1.6.1 Principe des formulations des BAP

Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures) en présence d'obstacles ou se mettre en place dans des coffrages de grande hauteur (30) (38). Ils doivent s'opposer à la ségrégation «dynamique» en phase de coulage et à la ségrégation « statique » une fois en place, afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement.

La formulation des BAP repose sur trois critères :

- Fluidification de la pâte : elle est obtenue sans ajout d'eau par utilisation de superplastifiant à fort pouvoir défloculant.

- La limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement : la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible ; le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mis en œuvre par vibration.
- Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation : elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additions.

1.6.2 Les méthodes de formulation

Depuis l'invention du béton autoplaçant, aucune méthodologie pratique de formulation n'a été établie. Les différentes propriétés recherchées rendent la formulation du BAP relativement compliquée (39).

Parmi les techniques de formulation les plus répandues on cite :

1.6.2.1 L'approche japonaise

La formulation des BAP par l'approche développée à l'université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats.

Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique.

Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation sont :

Dosage des gravillons : les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité.

Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système (grains + vides). Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

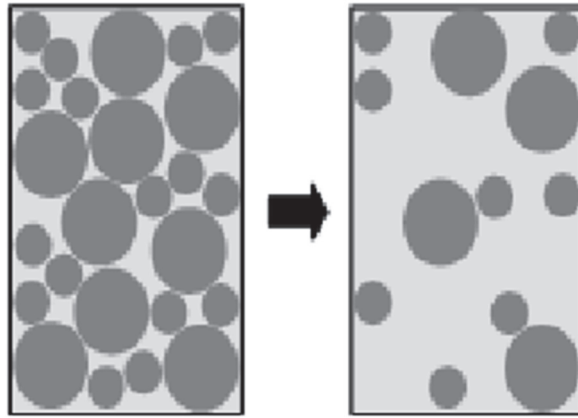


Figure 1.10 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité (40).

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

Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de 350 kg/m^3).

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

1.6.2.2 Approche française

C'est au laboratoire LCPC que les chercheurs ont développé un modèle mathématique basé sur un modèle de suspension solide. 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 précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- Les distributions granulaires.
- Les proportions du mélange.

- La compacité propre.
- La densité apparente.

D'après (13), la procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- La proportion du 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.
- Détermination du dosage en eau présence du superplastifiant, ce qui indique indirectement la mesure de la compacité, cette dernière permet l'entrée dans le programme de modèle.
- Les calculs sont effectués en tenant compte du confinement (effet de paroi). La viscosité est fixée de manière arbitraire à $5 \cdot 10^4$ la teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée sur la base des prévisions du modèle. 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 le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

1.6.2.3 Approche suédoise

La méthode suédoise repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions comme les fillers calcaires par exemple permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène.

La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables (13).

1.6.2.4 Approche basée sur un plan d'expérience

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un plan d'expérience pour connaître l'effet des paramètres de composition du béton. KHAYAT et al (9), ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (ciment + addition), le rapport massique eau sur fines, masse de superplastifiant et la masse de l'agent de viscosité.

Chaque facteur est varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre des compositions effectués à 25.

Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. (41).

1.6.2.5 Approche basée sur l'optimisation du volume de la pâte

Le volume de pâte est supposé jouer deux rôles dans un BAP. D'abord, il fluidifier le matériau en limitant les contacts entre les granulats. Ensuite, il écarte suffisamment les gravillons pour éviter la formation d'amas contre les armatures, responsables de blocages de l'écoulement. Plusieurs auteurs font l'hypothèse qu'il existe un volume de pâte minimal permettant de remplir chacune de ces deux fonctions (10).

1.6.2.6 Approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE

Le principe de cette méthode consiste à remplacer les graviers du béton par du sable dont la surface développée des grains est égale à celle du gravier que l'on a ôté.

L'approche du Mortier de Béton Equivalent (MBE) a été initialement développée au CTG (Guerville, France) (42) pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation d'un béton, en utilisant des tests sur mortier au lieu de tests sur béton. En fonction des essais préalables réalisés, les résultats obtenus peuvent être utilisés de façon qualitative ou quantitative. L'expérience accumulée au cours des dernières années dans de nombreuses applications industrielles a confirmé la validité de cette méthode (43). Cependant, l'ensemble de ces exemples concernait des bétons d'ouvrabilité classique.

O. HADDAD, S. AGGOUN et al (43), ont mené un travail qui consistait à l'extension de la méthode MBE aux BAP, en étudiant les compositions de 5 bétons et leurs MBE. Les auteurs ont pu confirmer qu'il est possible d'étendre la méthode MBE aux BAP et la composition particulière des BAP ne change pas les principes de calcul des MBE.

L. NACHBAUR et al ont aussi étudié la faisabilité de l'extension de la méthode MBE au BAP. Ils ont pu montrer que la méthode MBE qui était initialement développé pour des bétons d'affaissement inférieur à 21 cm peut être adaptée aux BAP et aussi que les principes de base de la méthode peuvent être gardés (30).

1.7 Exigences sur site

1.7.1 Fabrication

Les formules de BAP sont en général plus « pointues » que celles des bétons ordinaires. Les précautions et contrôles particuliers à mettre en place portent sur la maîtrise des constituants, le niveau d'équipement de la centrale, et les procédures de la fabrication des BAP qui doit intégrer les dispositions visant à maîtriser la teneur en eau du béton, la séquence de malaxage (ordre d'introduction, temps de malaxage), la fourchette d'étalement acceptable, les variations de dosage en eau correspondantes, ainsi que les contrôles sur béton frais.

Il est nécessaire d'appréhender au stade de l'étude de formulation la sensibilité des BAP aux écarts de composition et principalement aux variations de teneur en eau. La plage d'étalement du dosage en eau acceptable peut être obtenue en mesurant la résistance à la ségrégation du béton, les valeurs d'étalement, les taux de remplissage, et les densités en fonction du dosage en eau.

La formule possédant le plus fort dosage en eau doit présenter une stabilité satisfaisante. Celle contenant le dosage en eau le plus faible doit conduire à un temps de remplissage correct sans induire de ségrégation de la densité par manque de compactage gravitaire.

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. Donc, le malaxage d'un béton autoplaçant ne nécessite pas de matériel particulier ; il s'agit juste d'un malaxeur étanche dont le temps de malaxage est généralement plus long de 50 à 100 % que celui d'un béton ordinaire car on doit assurer une homogénéité du squelette granulaire d'une part, et une bonne dispersion du liant et ajouts chimiques dont les proportions sont très faibles d'autre part (44).

1.7.2 Transport du béton

Le béton prêt à l'emploi doit être acheminé le plus rapidement possible de la centrale au chantier, généralement en camion malaxeur. Il doit aussitôt être mis en place si l'on veut conserver sa qualité.

Pendant le transport, le béton doit être protégé des intempéries, du soleil, des courants d'air et du gel. Il ne faut jamais hésiter à le couvrir pour éviter les pertes d'eau. A l'arrivée au chantier, le bon de livraison et la conformité de la première fourniture au moins doivent être contrôlés par le responsable des travaux.

S'il s'agit de camions malaxeurs, il est indispensable de remélanger le béton à l'arrivée pendant 1 à 2 minutes avant le décharger. L'ajout d'eau supplémentaire est à proscrire dans tous les cas, car cette eau diminue la qualité du béton et sa dispersion peut être problématique.

Toutefois, si le responsable des travaux juge un tel ajout indispensable, celui-ci doit être mentionné sur le bon de livraison et le béton, s'il est certifié, perd son label de conformité à la norme. Pour les véhicules sans possibilité de malaxage, l'addition d'eau est à exclure dans tous les cas.

Si un véhicule ne peut pas être immédiatement déchargé à son arrivée au chantier, il doit pouvoir attendre dans un endroit abrité (à l'ombre). Si l'attente se prolonge, le béton ne pourra être utilisé que pour des travaux secondaires ou provisoires (remplissage, piste de chantier, etc.) (15).

1.7.3 Réception sur chantier

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

Dans le cas où seraient livrés sur chantier des bétons autoplaçant en même temps que des bétons ordinaires, une procédure de distinction des deux types de béton est à définir (15).

La procédure de réception suivante est recommandée :

- Prélèvement d'un échantillon de béton représentatif.
- Réalisation de l'essai d'étalement au cône d'Abrams.
- Vérification que le résultat est compris dans la fourchette d'acceptation.

Il est conseillé de réaliser un contrôle de réception au minimum sur la première charge de la journée de bétonnage et systématiquement en cas de doute.

1.7.4 Mise en œuvre

La principale différence, entre un BAP et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. La spécificité d'un BAP est d'être extrêmement fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas

de vibration pour être mis en place. Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale.

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

Les bétons autoplaçants peuvent être mis en place dans les moules par différentes méthodes (44) (10) :

Il existe plusieurs méthodes permettant de mettre en œuvre les BAP (45) :

Première méthode : traditionnelle et commune aux bétons ordinaires (BO), consiste à mettre en place le béton par le haut du coffrage au moyen d'une goulotte par exemple. Toutefois, le principal inconvénient lié à ce mode de mise en œuvre et sa propension à aggraver ou même à générer les phénomènes de ségrégation du béton frais dus à sa chute dans les coffrages.

Selon le groupe AFGC (Association Française de Génie Civil) bétons autoplaçants, il convient de limiter la hauteur de chute des BAP à une valeur maximale de 5 m. ».

Deuxième méthode : similaire à celle utilisée pour bétonnage de pieux, consiste à introduire un tube plongeur par le dessus du coffrage. Cette méthode s'applique aux éléments verticaux et présente l'intérêt d'éviter la chute du béton frais dans le coffrage.

Troisième méthode : consiste à mettre en place le béton à la pompe par le bas des coffrages. Cette méthode, qui s'applique également aux éléments verticaux, évite la chute du béton dans le coffrage, limite le personnel de chantier à la personne chargée de contrôler la pompe et permet d'envisager des bétonnages sur grande hauteur.

Dans le cas d'une mise en place du béton par le bas du coffrage à la pompe, la poussée par le béton frais est assurément au moins de type hydrostatique (effet dynamique de pompage).

1.7.5 Précautions pour l'emploi des BAP

La fluidité des BAP et leurs caractéristiques aux jeunes âges nécessitent le respect de quelques précautions particulières lors de leur mise en œuvre :

- Préparation et organisation spécifique du chantier : changement des habitudes et évolution des méthodes traditionnelles de construction (matériels, personnels, utilisation de la grue, phasage de réalisation, calages rigoureux des armatures et des réservations.
- Emploi de coffrages propres, étanches et plus résistants afin de compenser les poussées hydrostatiques sur les coffrages.
- Utilisation d'agents de démoulage de qualité afin d'éviter les phénomènes de micro-bullage.
- Cure soignée (ces bétons étant plus sensibles aux phénomènes de retrait par dessiccation). L'action de cure permet de diminuer très fortement les risques de fissuration au jeune âge.

Comme pour tous types de béton, des délais de décoffrage peuvent générer des différences de teintes de parements.

1.8 Quelques exemples des structures en béton auto plaçant

On peut citer quelques ouvrages réalisés en BAP :

- Les voiles de 16 m de hauteur sur 30 cm d'épaisseur de la salle principale du cinéma

MK2 Bibliothèque, à Paris

- Les massifs d'éoliennes à Plougras, comportant une densité d'armature importante.
- Le barrage Belbezet, nécessitant une consolidation des parois rocheuses et l'obstruction de cavités.
- Le pont Kiba Park. Où $650\,000\text{m}^3$ de bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance de la compression à 28 jours de 60 MPa (46).
- Le pont Akashi Kaikyo : le plus long pont suspendu au monde (3910m).
- 1991m entre les deux pylônes) où $770\,000\text{m}^3$ de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (47).
- Le bâtiment Landmark Tower où un béton autoplaçant d'excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40m de hauteur chacune (48).
- Le stade de Fukuoka où $10\,000\text{m}^3$ de béton autoplaçant ont été utilisés pour des sections très ferrillées et de formes compliquées (49).

1.9 Conclusion

La lecture de la littérature nous a permis de nous familiariser avec le BAP qui présente de nombreux avantages tels que la mécanisation de la production, de l'exécution sur chantier, l'amélioration des conditions environnementales .etc. Ces avantages doivent faire du BAP le matériau d'avenir dans le bâtiment et les travaux publics.

Nous avons pu remarquer que dans la 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.

Le BAP est un matériau qui doit présenter deux aspects, le premier étant la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les milieux confinés sans apport des vibrations et le deuxième constitue l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage. Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants (superplastifiant, entraîneurs d'air, agents de viscosité...) et des additions minérales (fumée de silice, fillers calcaires...). Plusieurs chercheurs ont essayé de développer des essais simples afin de mieux caractériser ce béton. Ces derniers seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapire 2 : Caractérisation des BAP

2.1 Introduction

Lorsqu'on s'intéresse au BAP on se trouve souvent confronté au problème de caractérisation de ces bétons. La caractérisation d'un béton autoplaçant consiste à décrire les propriétés à l'état frais et à l'état durci à l'aide d'un matériel adéquat de ces bétons.

A travers ce chapitre nous allons présenter les méthodes d'identification des BAP. Pour cela, on s'appuie sur un ensemble d'essais qui décriront les propriétés du matériau.

2.2 Propriétés d'un béton autoplaçant à l'état frais

La rhéologie du béton frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de béton lui-même. Un des avantages des bétons autoplaçants sera d'améliorer la maniabilité du mélange qui peut être évaluée par la mesure du diamètre d'étalement du béton, afin qu'il puisse remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration (l'étalement du béton et sa mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité) (29).

La compacité du béton est une propriété recherchée pour avoir une matrice homogène, afin de favoriser l'amélioration des qualités mécaniques et de durabilité du béton durci. Les chercheurs visent aussi à aboutir à la stabilité des bétons autoplaçants, en proposant différentes solutions (utilisation des agents colloïdaux et des superplastifiants), car en général le critère de fluidité-stabilité est assez difficile à assurer (29).

Par stabilité on entend la résistance à la ségrégation au ressuage.

Aussi, lors de sa mise en place les BAP ne doivent pas présenter des phénomènes de blocage (encombrement des granulats aux alentours des zones ferraillées).

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

Selon Khayat (41), les propriétés essentielles des BAP frais sont :

- Une excellente Fluidité (an Excellent deformability).
- Une bonne stabilité (a good stability).
- Un risque minime de blocage (alow risque of blockage).

En pratique, il est de première importance de s'assurer que le béton possède effectivement les qualités qu'on lui prête. Pour cela, il existe de nombreux essais empiriques et rhéologiques permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton autoplaçant.

2.3 Les essais de caractérisation des BAP à l'état frais

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

La facilité ou capacité de remplissage (the Self-compactibility) est définie comme l'aptitude du béton à rester homogène et remplir entièrement tous les coins du coffrage sans aucune vibration (30).

En ce qui concerne l'aptitude au remplissage, les travaux sur les BAP utilisent des tests non normalisés. En fait, pratiquement tous les laboratoires ont bricolé leur propre montage, ce qui complique grandement l'analyse des résultats de la littérature (29).

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

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

Les différents types de tests sont présentés dans ce qui suit :

2.3.1 Essai de l'étalement

C'est un essai utilisé pour estimer la fluidité des BAP sans confinement. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Figure 2.1). Le béton est introduit dans le cône sans compaction. On mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute. Une observation visuelle

permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon (6 litres) de béton. Selon Nagataki et Fujiwara une valeur de l'étalement comprise entre 500 et 700 mm suffit au béton pour être autoplaçant. Pour un étalement supérieur à 700 mm, le béton risque de subir une ségrégation, et pour des étalements inférieurs à 500 mm, le béton risque de présenter une déformabilité insuffisante pour pouvoir passer à travers les zones fortement armées (30).

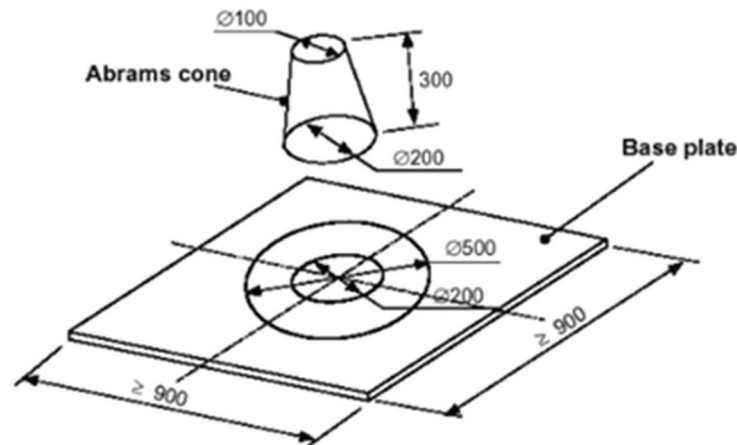


Figure 2.1 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (50).

D'après la norme NF EN 206-9, trois (03) classes d'étalement ont été définies :

Classe SF1 : étalement comprise entre 550 et 650 mm.

Classe SF2 : étalement comprise entre 650 et 750 mm.

Classe SF3 : étalement comprise entre 750 et 850 mm.

La mesure de la vitesse d'écoulement

C'est une mesure effectuée lors de l'essai d'étalement. C'est la mesure du temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 500 mm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Pour les BAP, cette valeur est généralement comprise entre 3 à 5 secondes (12).

2.3.2 L'essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel »

Cet essai a été développé par Ozawa et al (47). Il consiste à mesurer le temps d'écoulement d'un échantillon de 10 litres à travers un entonnoir en forme de « V » (Figure 2.2).

Le temps d'écoulement est déterminé suivant une procédure très simple : c'est le temps mesuré à partir de l'ouverture de l'orifice jusqu'à l'écoulement total du béton. Il doit être compris entre 6 à 12 s (4).

Les auteurs ont montré que cet essai permettait d'évaluer la fluidité du béton et également sa stabilité lors de l'écoulement (plus le temps d'écoulement est long moins le béton est fluide et plus il est visqueux).

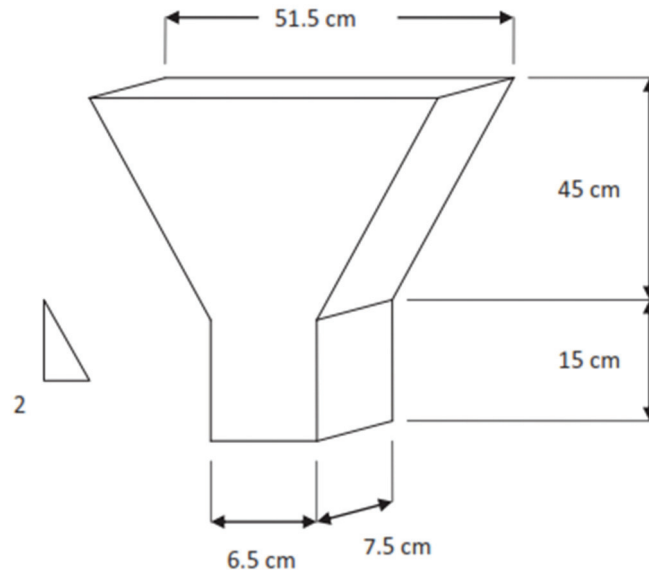


Figure 2.2 : Essai de l'entonnoir en forme de V (50).

2.3.3 Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, l'essai de stabilité au tamis vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation et du ressuage.

Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier.

L'essai de stabilité au tamis consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P laitance) d'un échantillon de béton (4.8 +/- 0.2kg) passant à travers un tamis ayant des mailles de 5 mm d'ouvertures (Figure 2.3).

Le mode opératoire consiste d'abord à verser 10 litres de béton juste après le malaxage dans un sceau ouvert pour protéger le béton de la dessiccation, après 15 min, on verse au centre d'un tamis de 5 mm d'ouverture un poids de béton égal à 5 kg, avec une hauteur de chute du béton de 50 cm, après 2 min on calcule le poids de laitance au tamis.

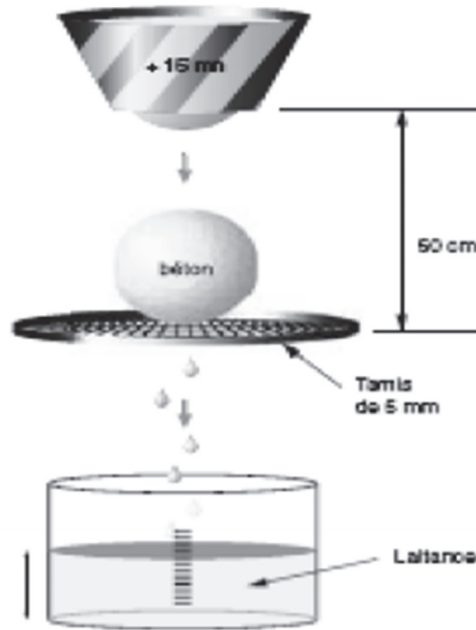


Figure 2.3 : Essai de stabilité au tamis (51).

Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplacant sont divisés en trois classes (36) (12) (4) :

Tableau 2.1: Critères d'acceptabilité d'une formulation d'un BAP.

Conditions	Critère de stabilité	Remarques
$0\% \leq \pi \leq 15\%$	Stabilité satisfaisante	Béton homogène et stable
$15\% \leq \pi \leq 30\%$	Stabilité critique	Vérifier les autres critères d'ouvrabilité
$\pi \geq 30\%$	Stabilité très mauvaise	Ségrégation systématique, béton inutilisable

Avec :

- $\pi = P_1 - P_0 / P_{\text{échantillon}}$
- P_0 : poids de fond plein vide.
- P_1 : poids de fond plein vide + poids de laitance.

2.3.4 Essai à la boîte « THE BOX TEST »

L'échantillon de béton est mis dans un des deux compartiments d'une boîte (Figure 2.4). Quand la porte de séparation des deux compartiments est levée, on mesure la dénivellation de hauteur du béton entre les deux compartiments. Cet essai permet d'évaluer la déformabilité du mélange qui sera excellente dans le cas où la dénivellation est négligeable (29). On note que cet essai est destiné à donner une appréciation sur la fluidité du béton et non sa capacité à

remplir un milieu confiné. C'est pour cela que la zone intermédiaire entre le compartiment A et B n'est pas muni d'un système d'armatures.

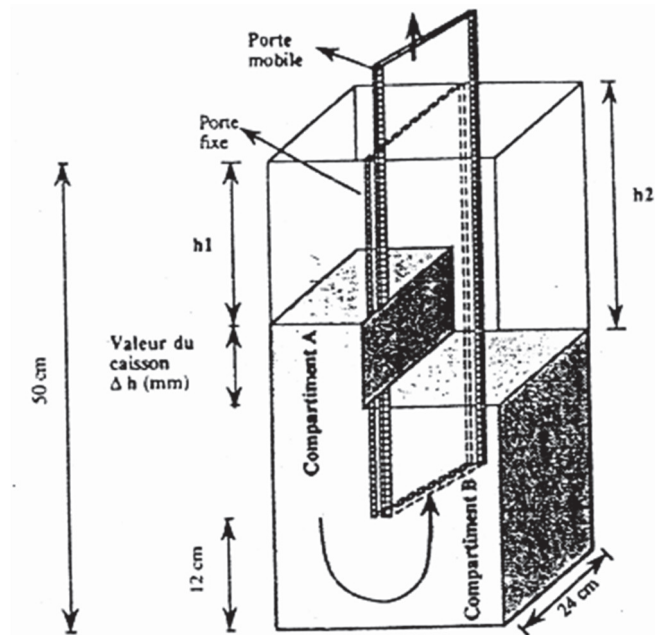


Figure 2.4 : Essai du "Box test" (29).

2.3.5 Essai d'étalement modifié

L'essai modifié fut développé par J-Ring au Japon et peut remplacer la boîte en L pour la mobilité en milieu confiné.

On utilise à nouveau le cône d'Abrams mais ; il permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages.

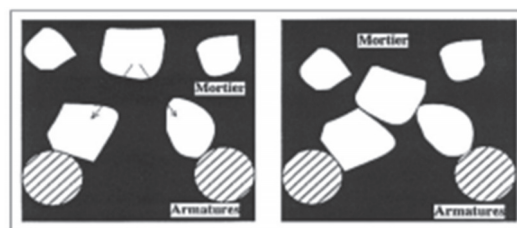


Figure 2.5 : Phénomène de blocage (28).

Le cône est placé sur une plaque plane, entourée par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm figure. Une fois le cône rempli, on soulève le cône ce qui laisse écouler le béton à travers les barres HA, on mesure en fin d'essai le diamètre de la galette obtenue. Un second paramètre peut être tiré du même essai : le temps mis par le béton pour dépasser le diamètre de 500 mm T50 en secondes (2) (52).

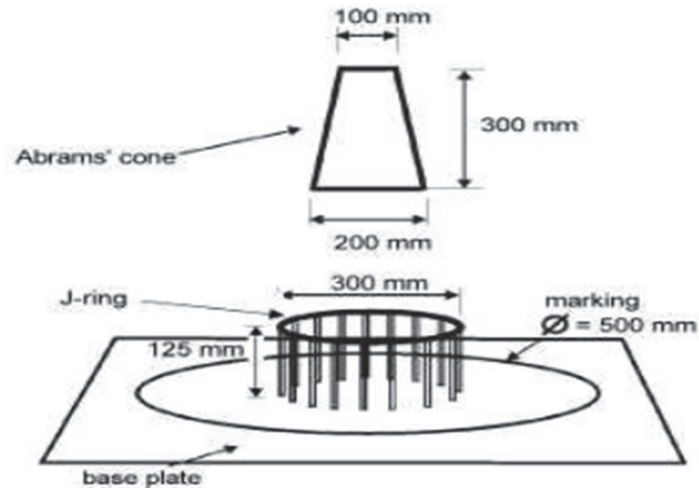


Figure 2.6 : Essai d'étalement modifié (52).

2.3.6 Essai de la boîte

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

Le diamètre des barres étant fixé, le changement d'espace entre les obstacles nécessite des boîtes de largeur différente. Le tableau suivant récapitule les géométries disponibles au LCPC (20).

Tableau 2.2 : Espacement et nombre d'armatures de l'essai de la boîte en L (20).

Espacement entre armatures (mm)	Nombre d'armatures	Largeur de la boîte (mm)
47	2	171
39	3	200
35	3	185
32	3	171
28	4	200
25	4	185

Le mode opératoire de l'essai est le suivant : la partie verticale du dispositif est remplie de béton (volume nécessaire de l'ordre de 13 l). Après arasement, le matériau est laissé au repos pendant 1 min. La trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage. A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale, sont mesurées (respectivement H1 et H2). Le rapport H2/H1 permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0.8. Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage et un amoncellement de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation (53) (36).

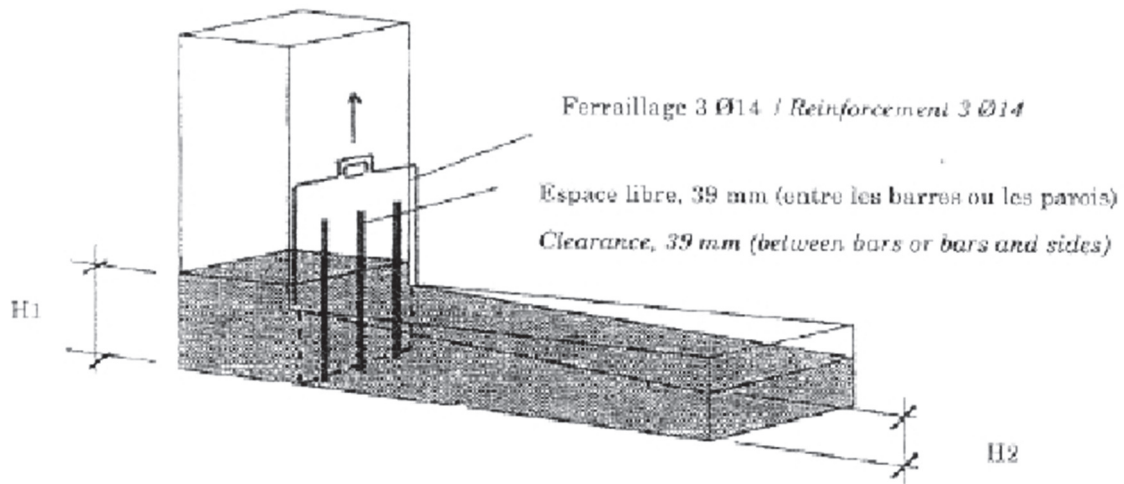


Figure 2.7 : Schéma de principe de l'essai de la boîte en L (23).

2.3.7 Essai de la boîte en U

« U-shaped apparatus » a été développé afin d'évaluer la facilité de remplissage dans les milieux fortement ferrailés. L'essai du U nécessite 16 l de béton et s'appuie sur la mesure de la hauteur B_h de béton dans la partie B2, après remplissage de la partie B1 et ouverture de la trappe. Dans ce cas, les auteurs estiment qu'un béton sera autoplaçant si B_h est supérieure à 30 centimètres (28).

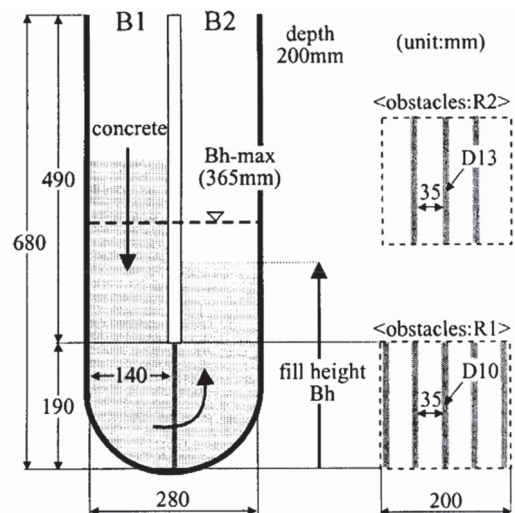


Figure 2.8 : le "U-shaped apparatus test method" (28).

La facilité de remplissage continue à s'améliorer jusqu'à une certaine valeur maximale. Au-delà de ce maximum, elle diminue. Cette diminution dans la facilité de remplissage est due à la ségrégation du béton (la ségrégation provoque la séparation des constituants, s'ensuit un encombrement des gros granulats autour des armatures, ce qui conduit à une obstruction de l'écoulement du béton).

Dans une étude présentée par T. Shindoh (Figure 2.9), le mélange optimal a été défini comme étant le mélange présentant le maximum de facilité de remplissage (30).

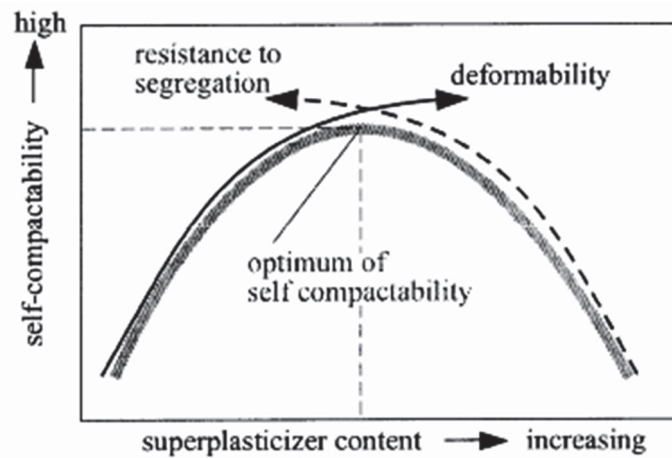


Figure 2.9 : Schématisation de la facilité de remplissage (30).

Un essai similaire (Figure 2.10) est présenté par Sedran et pour lequel quelques légers changements dans les dimensions de l'appareil. L'essai du U, s'appuie aussi sur la mesure de la hauteur H de béton dans la partie R2, après remplissage de la partie R1 et ouverture de la trappe. Dans cet essai, on applique une masse sur le béton de manière à créer une pression de 2400 Pa. Dans ce cas, un béton sera autoplaçant si H est supérieure à 30 cm.

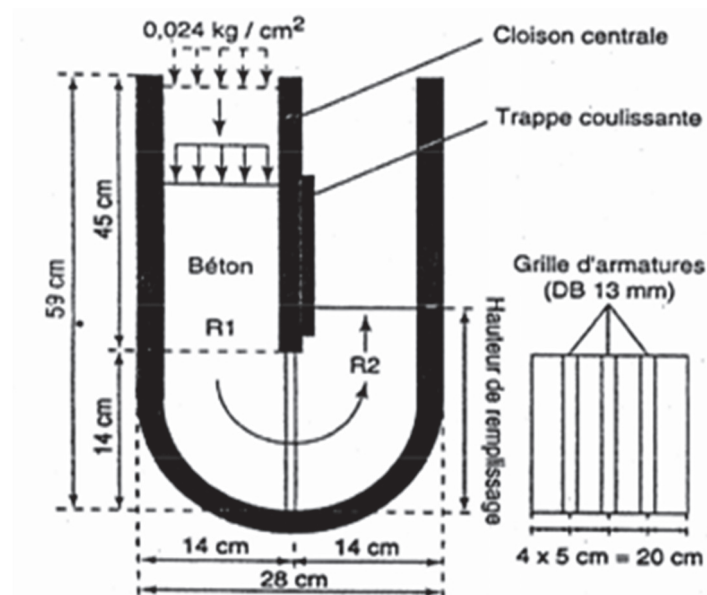


Figure 2.10 : L'essai du U (30).

2.3.8 L'essai de la passoire

C'est un des premiers essais utilisés. Un échantillon de 30 litres de béton est placé dans une boîte dont le fond est constitué d'une grille et d'une trappe amovible (Figure 2.11). Les

dimensions de la boîte sont 30 cm par 30 cm et les barres, de 16 mm de diamètre, sont distantes de 50 mm (entre axes). Le volume de béton réussissant à passer le treillis donne une idée de la capacité de remplissage. Pour un béton ayant une excellente capacité de remplissage, la quantité de béton traversant le treillis peut être aussi élevée que 95% de la masse totale de béton contenu dans la boîte (2) (54).

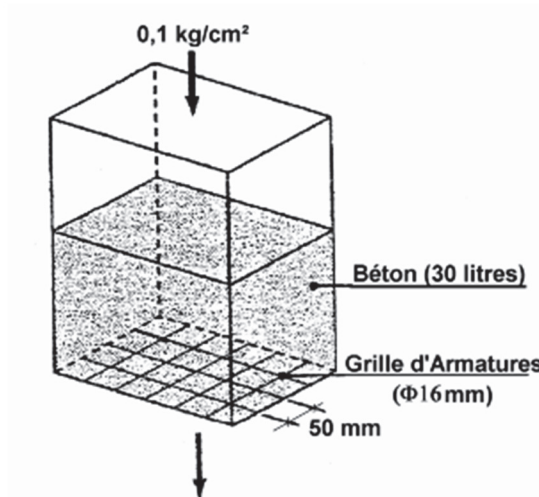


Figure 2.11 : L'essai de la passoire (54) (2).

2.3.9 Essai de capacité de remplissage « fillingcapacity »

C'est un essai connu aussi sous le nom de « Kajima Test » ou « Fill box test method ». Cet essai est utilisé pour mesurer la capacité de remplissage des BAP dont le diamètre maximal des granulats ne dépasse pas 20 mm.

Il s'agit d'une cuvette transparente de dimensions 300 x 500 x 300 mm. Le béton est versé avec un débit moyen de 0.2 l/s à travers un large entonnoir, puis celui-ci doit passer à travers un réseau de barres d'armatures de 16 mm de diamètre et espacées de 50 mm centre à centre (Figure 2.12). On arrête le déversement lorsque la hauteur du béton atteint 220 mm dans la partie non renforcée du récipient.

La capacité de remplissage du béton est définie comme étant le ratio de remplissage $F = A / (A + B)$ (54).

Avec :

- A : aire occupée par le béton (mm^2).
- B : aire non occupée par le béton (mm^2).

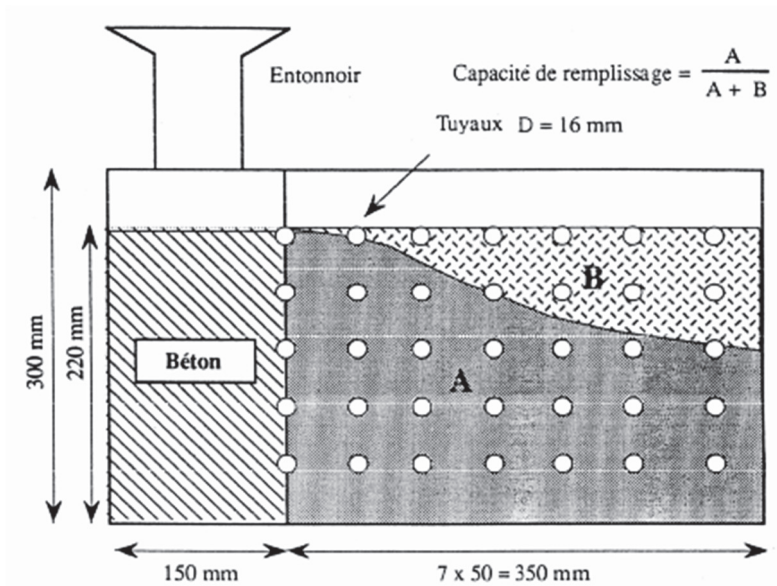


Figure 2.12 : Essai de la capacité de remplissage "Essai du caisson" (20).

Cet appareil est aussi présenté sous une forme légèrement différente par le document *Spécification and Guidelines for Self-Compacting Concrete* (55). Selon cette référence, dans la cuvette sont disposés 35 obstacles en PVC de diamètre 20 mm espacés de 50 mm. Comme on peut le voir sur la Figure 2.13. Sur la cuvette est disposée une colonne de remplissage (diamètre 100 mm, hauteur 500 mm) surmontée d'un entonnoir (hauteur 100 mm). Toutefois, le mode opératoire et l'interprétation des mesures restent les mêmes.

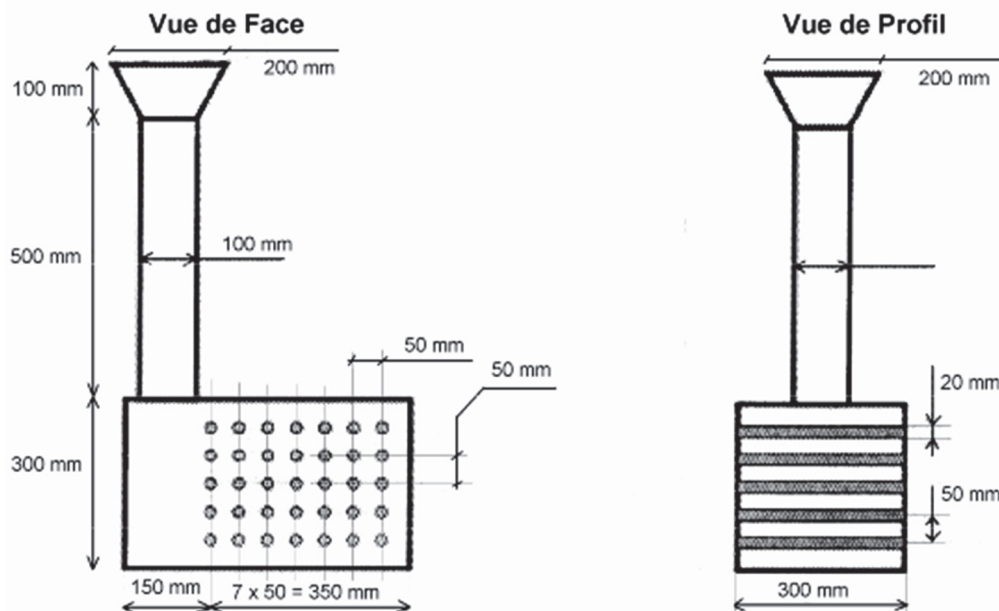


Figure 2.13 : Essai du caisson (55).

2.3.10 Essai de ressuage

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

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton.

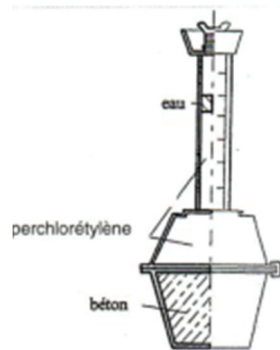


Figure 2.14 : Essai de ressuage (56).

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié. Le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer (figure). Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donnée la nocivité du produit (56).

2.3.11 Essais complémentaires sur béton frais

2.3.11.1 Mesure de la teneur en air occlus

Pour la mesure de la teneur en air occlus dans le béton frais, on utilise la méthode dite « par pression ». Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton (37).

Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre selon la norme française (NF P18-353) (Figure 2.15).

Le pourcentage de l'air occlus dans les bétons autoplaçants n'est pas limité à une valeur fixe, mais, plus il augmente plus il influe négativement sur les performances mécaniques des BAP.

Le principe est de remplir un volume déterminé du béton, de mettre en pression le récipient hermétiquement clos situé au-dessus, mettre en contact les deux récipients et accéder directement à la valeur de la teneur en air occlus.



Figure 2.15 : Aéromètre pour la mesure de l'air occlus (45).

2.3.11.2 La masse volumique

La masse volumique réelle du béton frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique. Elle est mesurée par la pesée d'un récipient de 7 litres (fond de l'aéromètre) rempli de béton autoplaçant sans vibrer (Figure 2.16) (44).



Figure 2.16 : Mesure de la masse volumique réelle (45).

Si M est la masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle) et M_0 celle du récipient vide, la densité est déduite de la formule suivante :

$$M_{vr} = (M - M_0) / V \quad [\text{kg/m}^3]$$

Avec :

- M_{vr} est la masse volumique réelle du béton frais.
- V le volume du récipient utilisé (7 litres).

La masse volumique réelle M_{vr} est normalement égale à la masse volumique théorique M_v calculée à partir de la formulation théorique du béton avec comme source d'incertitude la quantité d'air occlus.

2.4 Propriétés mécanique du BAP à l'état durci

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons supposées différentes de celles des bétons vibrés (53).

2.4.1 Résistance à la compression

Ces dernières années, l'utilisation des ajouts minéraux dans une formulation des BAP, génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement, par un effet physique et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs, par la suite (53).

Les essais de mesure de la résistance à la compression (Figure 2.17) sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm.



Figure 2.17 : Mesure de la résistance à la compression des éprouvettes 16 x 32 cm (51).

Ce test fournit la force de compression N qui génère la rupture de l'échantillon figure. La contrainte de compression à la rupture en MPa est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée (23).

2.4.2 Résistance à la traction

Certains auteurs ont constaté qu'il n'y a aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des BO. Par contre, d'autres ont montré que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des BO. En comparant des mélanges de BAP à même E/C, on trouve que le type et la finesse de poudre affectent peu la résistance de traction (44).

Les essais de traction par flexion

Cet essai (Figure 2.18) très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages. Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont prismatiques de dimensions (7 x 7 x 28) cm.

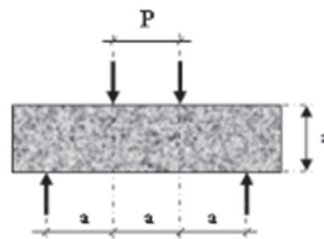


Figure 2.18 : Schématisation de l'essai de traction par flexion (51).

La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante : $\sigma = M \times \frac{a}{2I}$

Avec :

- M le moment de flexion $M = f \times L / 4$ où f est la charge de rupture, L la portée, I l'inertie de flexion et a le côté du prisme..

2.4.3 Module l'élasticité

D'après différents codes (Eurocode, BAEL. etc.), le module d'élasticité est en fonction de sa résistance en compression. Donc à résistance égale, un BAP devrait avoir le même module qu'un béton vibré (BV) (Figure 2.19) (57).

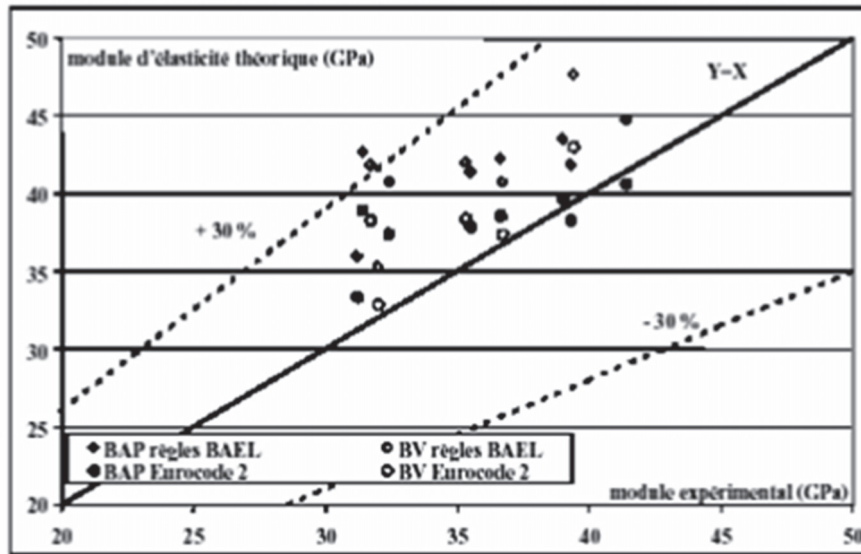


Figure 2.19 : Comparaison des modules élastiques théoriques des BAP et de bétons vibrés avec leur valeurs expérimentales (53).

Persson, Pons et al ont montré que le module est similaire pour les BAP et les BV. De même, König et al constatent que les modules des BAP sont très proches de ceux des BV. D'autres auteurs indiquent un module plus faible que ceux des BV.

Comme pour la résistance à la compression, d'autres paramètres influencent le module d'élasticité. Turcy et al montrent une diminution du module des BAP avec l'augmentation du volume de pâte. Mais, selon ces mêmes auteurs, l'influence du volume sur le module est négligeable. En effet, Pineaud observe des valeurs de déformations à la rupture très proches pour les BAP et les BV. Parallèlement au volume de pâte, il est observé une diminution du module avec l'augmentation du rapport E/L (résultat en accord avec la diminution de la résistance en compression et la diminution de la compacité de la matrice) (58).

2.5 Conclusion

Le BAP est un matériau qui doit présenter deux aspects, le premier étant la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les milieux confinés sans apport des vibrations, et le deuxième constitue l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage.

Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants (superplastifiant, agent de viscosité) et des additions minérales (fumée de silice, fillers calcaires. etc.). Plusieurs chercheurs ont essayé des essais afin de mieux caractériser ce genre de béton.

Chapire 3 : Programme expérimental

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous passons en revue les différents matériaux impliqués dans la composition du béton autoplaçant, leurs caractéristiques ainsi que le dosage de chaque constituant dans la formulation de notre béton.

Nous procéderons donc à la présentation des essais et procédure permettant l'identification des matériaux de base utilisés (matériaux locaux) et à la caractérisation des bétons élaborés.

3.2 Caractérisation des matériaux

On utilise une gamme de constituants disponibles et très utilisés localement, Les différents constituants utilisés sont :

- Ciment du type CEM II/A de Sour El-Ghozlane.
- Des granulats (sable et gravier).
- Deux (02) types de supeplastifiant de Granitex.
- L'eau du robinet du laboratoire de génie civil de l'Ecole Nationale Polytechnique.

3.2.1 Les granulats

Les normes NF P 18-101 définissent les caractéristiques des granulats, pouvant être utilisés pour la confection des bétons. Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiments et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage ; il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

3.2.1.1 Echantillonnage (NF P18-553)

C'est l'opération qui consiste à prélever un échantillon représentatif du matériau pour effectuer les essais. Elle peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur (Figure 3.1).



Figure 3.1: L'appareil d'échantillonnage.

3.2.1.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur (Figure 3.2).



Figure 3.2 : Tamis d'analyse granulométrique.

Les résultats de l'analyse granulométrique du gravier et du sable sont représentés dans les tableaux 3.1 et tableau 3.2 respectivement.

Tableau 3.1 : L'analyse granulométrique du gravier.

Poids de l'échantillon : 2000 g				
Ouverture des tamis (mm)	Poids (g)		Teneurs (%)	
	Refus	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisât cumulé
20	0	0	0	0
16	74	74	3.7	3.7
12.5	440	514	22	25.7
10	432	946	21.6	47.3
8	632	1578	31.6	78.9
6.3	344	1922	17.2	96.1
5	72	1994	3.6	99.7
2.5	6	2000	0.3	100

Tableau 3.2 : L'analyse granulométrique du sable.

Poids de l'échantillon : 2000 g				
Ouverture des tamis (mm)	Poids (g)		Teneurs (%)	
	Refus	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisât cumulé
5	10	10	0.5	0.5
2.5	366	376	18.3	18.8
1.25	528	904	26.4	45.2
0.63	436	1340	21.8	67
0.315	276	1616	13.8	80.8
0.16	146	1762	7.3	88.1
0.08	126	1888	6.3	94.4
Fond	112	2000	5.6	100

3.2.1.3 Masses volumiques absolue et apparente : NF P 18-554 et NF P 18-555

La masse volumique d'un granulat est le rapport entre sa masse et son volume. Pour un granulat donné, ce rapport est une constante qui est propre aux caractéristiques physiques du granulat. Elle permet alors de caractériser un granulat et d'établir un lien entre sa masse et son volume. La masse volumique permet donc de connaître le volume d'un granulat lorsque l'on connaît sa masse et réciproquement.

L'observation d'un granulat montre que les grains qui le constituent sont entourés de vide. Par conséquent le volume d'un granulat peut désigner deux choses : le volume des grains seuls ou le volume des grains avec l'air qui les entoure.

Le volume des grains est appelé volume absolu et le volume des grains avec l'air est appelé volume apparent.

Puisqu'il existe deux volumes pour désigner un granulat, il existe alors deux masses volumiques.

La masse volumique apparente du granulat désigne le rapport entre la masse du granulat et le volume apparent du granulat.

La masse volumique absolue du granulat désigne le rapport entre la masse du granulat et le volume absolu du granulat.

La détermination des masses volumiques d'un granulat nécessite donc de mesurer la masse d'un échantillon, le volume apparent correspondant et le volume absolu correspondant, puis d'établir les rapports nécessaires.

➤ Masse volumique apparente

En laissant tomber du gravier d'une dizaine de centimètres et sans le tasser dans un récipient de 02 litre, le volume apparent de l'échantillon de gravier vaut un litre. Le récipient doit être arasé avec une règle par mouvement de va et vient (figure 3.3).

La pesée de cet échantillon sur une balance tarée à la masse du récipient indique la masse de gravier correspondant à cet échantillon.

La masse volumique apparente représente le rapport entre cette masse et le volume apparent correspondant, le résultat est présenté dans le tableau 3.3.



Figure 3.3 : Mesure de la masse volumique apparente.

Tableau 3.3 : Masses volumiques apparente des granulats.

Granulat	Gravier	Sable
Densité apparente (g/cm ³)	1.295	1.43

➤ Masse volumique absolue

La masse et le volume absolu correspondant peuvent être mesurés simultanément sur un échantillon d'un volume apparent de l'ordre de 1 litre. Prendre un récipient gradué de 2 litres et le remplir d'un litre d'eau environ. Placer ce récipient sur une balance et tarer la balance.

Le volume absolu est mesuré en immergeant complètement l'échantillon dans le récipient gradué. En effet l'augmentation du volume de l'eau est intégralement produite par le volume des grains de gravier. La mesure de la variation de hauteur d'eau correspond donc au volume absolu du gravier.

La lecture de la masse sur la balance représente la masse de gravier correspondant à ce volume. La masse volumique absolue représente le rapport entre cette masse et le volume absolu correspondant.



Figure 3.4 : Mesure de la masse volumique absolue.

Les résultats sont donnés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Masses volumiques absolue des granulats.

Granulat	Gravier	Sable
Densité absolue (g/cm ³)	2.48	2.5

3.2.1.4 Coefficient Los Angeles (NF P 18-573)

La limitation de la fragmentation permet d'éviter d'utiliser des gravillons dont la granularité pourrait évoluer (effritement) pendant le malaxage et le transport, ce qui modifierait les propriétés du béton.

On place un échantillon de 5 kg de granulats 11 boulets dans un tambour ; après un nombre normalisé de tours du tambour, on récupère le passant P au tamis de 1.6 mm (Figure 3.5).

*Figure 3.5 : Essai Los Angeles.*

Le coefficient Los Angeles est calculé par la formule suivante :

$$LA = P \times 100 / 5000.$$

Avec : P : le pasant au tamis 1.6 mm.

Tableau 3.5 : Résultat de l'essai de LA.

Critère	Valeur	Spécification
LA (%)	15	< 15 très bon à bon 15-20 bon à moyen 20-30 moyen à faible > médiocre

3.2.1.5 Module de finesse : (NF P18-304)

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur du sable.

- Un module de finesse élevé correspond à un sable grossier.
- Un module de finesse faible correspond à un sable fin.

La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable.

Le module de finesse est défini par le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5. Le tableau 3.6 présente les résultats obtenus.

Tableau 3.6 : Le module de finesse.

Critère	Valeur	Spécifications
Module de finesse (Mf)	3.0	2.8 < Mf < 3.2 sable grossier 2.2 < Mf < 2.8 sable moyen 1.8 < Mf < 2.2 sable fin

Donc, notre sable est un sable grossier.

3.2.1.6 Equivalent de sable (NF P18-598)

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'E.S. exprime le pourcentage des fines contenues dans le sable.

L'absence de fines ne permet pas d'obtenir un béton compact et diminue les résistances mécaniques.

L'excès de fines est défavorable dans la mesure où il augmente la demande en eau, donc le rapport E/C.

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable tamisé avec un tamis de 2.5 mm dans une éprouvette normalisée remplie par une solution flocculante ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H) et du sédiment + flocculant (H) (Figure 3.6).

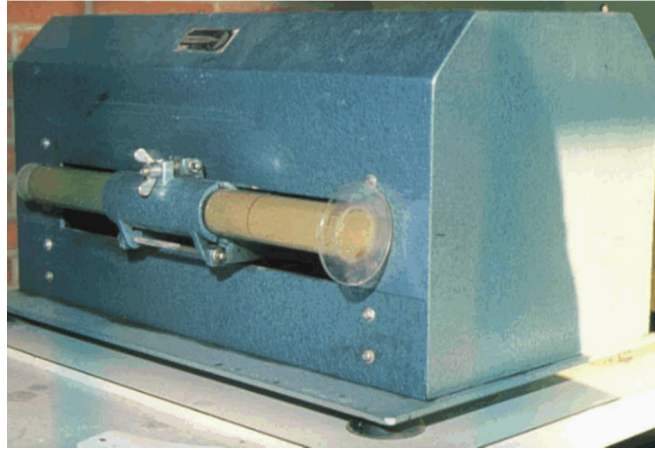


Figure 3.6 : Essai équivalent de sable.

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$ES = (H1/H2) \times 100$$

L'essai a donné le résultat présenté dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Résultat de l'essai ES.

ES (%)	70	Sable propre - à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
--------	----	---

3.2.2 Le ciment

Les ciments utilisés sont de type CPJ CEM II/A 42.5 provenant de l'usine de Sour El-Ghozlane, Wilaya de Bouira (Figure 3.7).



Figure 3.7 : Le ciment utilisé

Les différentes caractéristiques que ce soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur les fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même. Les différentes caractéristiques sont présentées dans l'annexe A.

3.2.3 Les adjuvants

Conformes à la norme EN 934-2, on a utilisé dans cette étude les superplastifiants : MEDA FLOW 30, MEDA FLUID SF150 fournis par l'entreprise Granitex.

3.2.3.1 MEDA FLOW 30

MEDA FLOW 30 (Figure 3.8) : haut réducteur d'eau/conforme à la norme EN 934-2, est un superplastifiant haut réducteur d'eau.



Figure 3.8 : Le superplastifiant MEDA FLOW 30.

Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Ces caractéristiques sont données dans le tableau 3.8 :

Tableau 3.8 : Les caractéristiques du MEDAFLOW 30.

Forme	Liquide
Couleur	Brun clair
PH	6-6.5
Densité	1.07± 0.01
Teneur en chlore	< 1g/l

Dans les paragraphes suivantes le MEDAFLOW30 sera représenté par : le superplastifiant (S1).

La fiche technique du superplastifiant (S1) est jointe dans l'annexe B.

3.2.3.2 MEDA FLUID SF 150

C'est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Son utilisation dans le béton permet d'accélérer le durcissement du béton d'une manière significative (Figure 3.9).



Figure 3.9 : Le superplastifiant MEDA FLUID SF 150.

Il est compatible avec tous les types de ciment et se dilue parfaitement dans l'eau de gâchage. Les caractéristiques du MEDA FLUID SF150 sont données dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 : Les caractéristiques du MEDA FLUID SF 150.

Forme	Liquide
Couleur	Marron
PH	9.5-10.5
Densité	1.19 ±0.01
Teneur en chlore	< 1g/l

Dans les paragraphes suivants le MEDA FLUID SF 150 sera représenté par le superplastifiant (S2).

La fiche technique du superplastifiant (S2) est jointe dans l'annexe C.

3.2.4 Eau de gâchage

L'eau utilisée dans notre cas est l'eau potable du laboratoire du génie civil de l'Ecole Nationale Polytechnique Alger.

3.3 Elaboration des BAP

Dans la littérature, on retrouve un grand nombre d'approches et méthodes de formulation pour les BAP, nous avons retenu pour notre étude la méthode dite « Japonaise » proposée par Okamura et al. Cette méthode qui est purement expérimentale nous semble très pratique et ne demande pas beaucoup de moyens pour son application.

3.3.1 Présentation de la méthode Japonaise d'Okamura et al.

On reprendra dans ce paragraphe les fondements de la méthode japonaise exposés au paragraphe 1.6.2.1 et que nous développerons en détails.

Les chercheurs de l'université de Tokyo ont été les premiers à proposer une méthode de formulation des bétons autoplaçants.

La teneur volumique du béton en gravillon est fixée à 50% de leur compacité. On note que les auteurs ne précisent pas comment a été mesurée la compacité des gravillons. Les auteurs prétendent, sur la base de nombreux essais, qu'un tel ratio permet d'éliminer les risques de blocage si le mortier est convenablement formulé.

De même, afin d'assurer une ouvrabilité suffisante au mortier, ils fixent le volume de sable égal à 40% du volume total du mortier. Il est important de noter que les auteurs excluent du terme sable toutes les fines inférieures à 90 micromètre, qui sont considérées comme poudre au même titre que les liants.

3.3.2 Formulation de la variété des BAP étudiés

Nous avons respecté les conditions nécessaires permettant de garantir l'autoplaçabilité tout en se basant sur des compositions proposées dans la littérature ci-dessus. Dans un mètre cube on fixe les rapports suivants :

- $G/S = 1$, pour augmenter la quantité de sable, ce qui permet d'assurer une meilleure stabilité et une quantité suffisante de mortier.
- $E/C = 0.4$, le dosage en ciment étant constant, la diminution de ce rapport de 0,5 à 0,4 s'explique par une diminution de la quantité d'eau tenant compte de la présence de superplastifiant.
- Le volume d'air occlus (A) est de l'ordre de 5%.

A noter que Pour les BAP, le dosage du ciment est en général compris entre 350 et 400 kg/m^3 . Pour notre cas on a choisi de prendre un dosage de 400 kg/m^3 .

3.3.2.1 Détermination de dosage des différents constituants

Pour un rapport E/C=0.4

En supposant que G, S, C, E et A sont respectivement les volumes de gravier, sable, ciment, eau de gâchage et vides (Air Occlus) on peut écrire (en litres) et pour 1 m^3 :

$$G + S + C + E + A = 1000 \text{ l.}$$

Avec :

$$A = 50 \text{ l/ m}^3$$

$$E/C = 0,4 \text{ avec } C = 400 \text{ kg / m}^3 = (400/3,1) \text{ l/m}^3 = 129,03 \text{ l/ m}^3 \text{ et } \rho_{\text{ciment}}=3.1$$

$$\text{On a donc } E = 160 \text{ l/ m}^3$$

$$\text{On obtient alors } G + S = 1000 - 50 - 129. - 160 = 661 \text{ l.}$$

Le rapport étant fixé à : $G/S = 1$ on peut calculer les volumes G et S :

$$G = S = 330.5 \text{ l/ m}^3.$$

On regroupe les compositions précédentes dans le tableau 3.10 :

Tableau 3.10 : Dosage des différents constituants pour un rapport E/C=0.4.

Composant	Composant (l/m ³)	Densité absolue	Composant (kg/m ³)
Gravier	330.5	2.5	826.25
Sable	330.5	2.48	819.64
Ciment	129	3.1	400
Eau	160	1	160

Pour un rapport E/C=0.35 :

On suit les mêmes étapes on trouve les résultats du tableau 3.11.

Tableau 3.11 : Dosage des différents constituants pour un rapport E/C=0.35.

Composant	Composant (l/m ³)	Densité absolue	Composant (kg/m ³)
Gravier	340.5	2.5	851.25
Sable	340.5	2.48	844.44
Ciment	129	3.1	400
Eau	140	1	140

Les bétons élaborés sont :

BAP 1 : sans superplastifiant et $E/C=0.4$ (témoin).

BAP 2 : avec un dosage de 1.5% S1 et $E/C=0.4$.

BAP 3 : avec un dosage de 2% S1 et $E/C=0.4$.

BAP 4 : avec un dosage de 2% S1 et $E/C=0.35$.

BAP 5 : avec un dosage de 1.5% S2 et $E/C=0.4$.

BAP 6 : avec un dosage de 2% S2 et $E/C=0.4$.

BAP 7 : avec un dosage de 2% S2 et $E/C=0.35$.

3.3.3 Mode opératoire

- La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.
- Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé. Dans notre cas, elle est de $1/20$ ème du m^3 (Figure 3.10).
- Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant, on suit le mode opératoire suivant :
 - Vérifier en premier le nombre et l'état des moules cylindriques nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
 - Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
 - Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement dans l'étuve.
 - Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée ($1/2$ la quantité total d'eau + $1/2$ la quantité total du superplastifiant).
 - Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment) et les introduire dans le malaxeur.
 - Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
 - Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).

- Ajouter la deuxième moitié d'eau et de superplastifiant.
- Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage.



Figure 3.10 : Le malaxeur utilisé avec une capacité de 1/20 ème m³.

En ce qui concerne la caractérisation mécanique, notre programme expérimental comprend un type d'essai (essai de compression) qui doit être effectué à des échéances bien précises :

3.3.3.1 Epreuve cylindriques 16 X 32 cm²

Nous avons utilisé des moules cylindriques 16 x 32 cm² conformément à la norme NF P 18-406 pour la résistance mécanique à la compression (Figure 3.11).



Figure 3.11 : L'éprouvette normalisée 16 x 32 cm² conformément à la norme NF P 18-406.

Ce type d'éprouvette a été conçu pour la détermination de la résistance en compression ; la charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai à 28 jours.

3.3.3.2 Conservation des éprouvettes

Après le gâchage pour un béton ordinaire ou pour un BAP, les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h.

Une fois démoulées, pour assurer un bon mûrissement du béton, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau à une température de 20°C, ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment.

3.4 Caractérisation des bétons élaborés

Nous avons décrit dans les paragraphes précédents, les appareils et les méthodes dans le cadre de ce travail pour caractériser le béton à l'état frais et durci.

3.4.1 Caractérisation à l'état frais

Avant d'accepter une composition comme étant celle d'un BAP, il faut s'assurer que les propriétés du béton à l'état frais possèdent certains critères établis selon les recommandations. Différents essais spécifiques permettent de caractériser les BAP à l'état frais. On présentera ceux qui ont été utilisés dans cette étude : Essai d'étalement ou « slump flow », mesure de la vitesse d'écoulement T_{50} et l'essai de stabilité au tamis.

3.4.1.1 Essai d'étalement

L'étalement est mesuré au cône d'Abrams. Nous avons, bien évidemment, caractérisé l'ouvrabilité des bétons étudiés à l'aide du cône, qui reste l'outil de contrôle le plus utilisé sur chantier. (Figure 3.12).



Figure 3.12 : L'essai d'étalement.

L'ouvrabilité des bétons autoplaçants est caractérisée par la moyenne de deux diamètres perpendiculaires de la galette obtenue en fin d'essai (après une minute).

L'appareillage et le mode opératoire sont décrits dans l'annexe D.

3.4.1.2 Essai de stabilité au tamis

A travers cet essai, on peut quantifier le pourcentage en poids de laitance. Il caractérise le risque de ségrégation.

On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers d'un tamis d'ouverture 5 mm. On considère qu'une valeur inférieure à 15 % de laitance est caractéristique d'un béton stable (Figure 3.13).



Figure 3.13 : Essai de stabilité au tamis

L'appareillage et le mode opératoire sont décrits dans l'annexe E.

3.4.2 Caractérisation du mélange à l'état durci

Les essais de compression simple sont réalisés à 28 jours par écrasement d'éprouvettes de bétons cylindriques 16 x 32 cm² qui ont été conservées après démoulage à une température de 20°C.



Figure 3.14 : Epreuve avant le démoulage.



Figure 3.15 : Epreuve après le démoulage.

Les éprouvettes sont placées verticalement et leurs faces sont en contact direct avec les plateaux de la presse. Elles sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour l'essai à la compression conforme à l'EN 12390-4.

La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression est calculée par la formule :

$$R_c = F_{\max} / A_c$$

Avec :

- F_{\max} : en (N) : La charge maximale.
- A_c (en mm^2) : La section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 3000KN, asservie en force. La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé 02 points différents :

On a commencé par donner les principales caractérisations des constituants et leurs différentes proportions nécessaires pour la fabrication des BAP.

Ensuite, nous avons indiqué les essais réalisées sur les BAP à l'état frais et durci. Les résultats et l'interprétation de ces essais vont être traités dans le chapitre suivant.

Chapire 4 : Résultats et interprétations

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats et les discussions de la caractérisation des mélanges dans le but de générer un ensemble d'informations suffisent qui nous permettra de déterminer l'effet du type et du dosage de superplastifiant ; ainsi que l'effet du rapport eau /ciment, sur les performances rhéologiques et mécaniques des bétons.

4.2 Les résultats d'essai sur les bétons frais

4.2.1 L'essai à cône d'Abrams

Les résultats obtenus par cet essai sur les différents bétons sont présentés dans le tableau 4.1 :

Tableau 4.1 : Tableau des résultats d'essai à cône d'Abrams.

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6	BAP7
Étalement (mm)	/	530	670	610	640	740	680
Affaissement	Affaissement total						
T ₅₀ (s)	/	4.8	3.2	4.5	3	2.1	2.8

Avec :

- T₅₀ : le temps nécessaire pour atteindre un diamètre de 500 mm.

On remarque que :

- L'étalement et l'affaissement de BAP1 est presque nul à cause de la réduction de la quantité d'eau utilisée et à l'absence de superplastifiant.
- L'affaissement total des autres BAP dosée avec un certain dosage de superplastifiant.
- Lorsqu'on augmente le dosage en superplastifiant de 1,5% (BAP2) à 2% (BAP3) on note une amélioration de la fluidité du béton de 530 à 670 mm (E/C=0.4).
- Le rapport E/C a également affecté sur la fluidité des BAP, une diminution de ce rapport de 0.4 (BAP 3) à 0.35 (BAP 4) engendre une diminution de diamètre d'étalement de 670 à 610 mm.
- Les mêmes remarques observées sur l'essai d'étalement, sont remarqués pour la mesure de la vitesse d'écoulement.

4.2.2 L'essai de stabilité au tamis

Cet essai a été effectué sur tous les BAP, le tableau 4.2 présente les résultats obtenus.

Tableau 4.2 : Résultats d'essai de stabilité au tamis.

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6	BAP7
Poids de laitance (%)	0.1	4.2	8	5.1	10.1	15.8	12.8

On remarque que :

- Le pourcentage de laitance de BAP1 est presque nul, cela revient à l'absence de superplastifiant.
- Tous les autres bétons dosés en superplastifiant ont une bonne stabilité (< 15%) sauf le BAP 6).

4.2.3 Essai de la résistance à la compression

Les essais effectués sur les différents ont donné les résultats présentés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Résultats d'essai de la résistance à la compression.

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6	BAP7
Résistance à la compression (MPa)	33	37.1	39.5	44	36.5	39	42

On constate que :

- L'augmentation de la résistance en présence de superplastifiant (de 33 MPa pour le BAP 1 à 39.5 MPa pour le BAP 3 par exemple) et en augmentant le dosage (de 37.1 MPa pour le BAP 2 à 39.5 MPa pour le BAP 3).
- La diminution du rapport E/C à la même influence sur la résistance de 39.5 pour le BAP 3 à 44 pour le BAP4.

4.2.4 Récapitulatif des résultats

Le tableau 4.4 est un récapitulatif des performances des différents types de bétons à l'état frais et durci.

Tableau 4.4 : Récapitulatif des résultats.

Béton	Étalement (cm)	Affaissement	Stabilité au tamis (%)	Résistance à la compression (MPa)
BAP1	/	/	0.1	33
BAP2	530	Affaissement Total	4.2	37.1
BAP3	670		8	39.5
BAP4	610		5.1	44
BAP5	650		10.1	36.5
BAP6	750		18.8	39
BAP7	680		14.8	42

4.2.5 Observations visuelles

Une observation du comportement du béton lors de la réalisation des essais, peut nous renseigner sur ses performances. Les phénomènes observés sont :

- Le phénomène de ségrégation lors de l'étalement au cône d'Abrams.
- La maniabilité du béton lors du malaxage.
- Le ressuage et la stabilité lors du remplissage des moules.
- La ségrégation statique et l'homogénéité après écrasement des éprouvettes.

4.3 Interprétations

D'après les résultats présentés dans le tableau 4.4, on peut facilement apercevoir l'effet des superplastifiants et de la quantité d'eau utilisée sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçant.

4.3.1 Caractérisation rhéologiques

4.3.1.1 Effet de la présence et du dosage de superplastifiant

Essai d'étalement

D'après les essais d'étalements effectués au cône d'Abrams, on constate que pour le BAP 1 (absence de superplastifiant) la valeur d'étalement est presque nul cela ne permet même pas de considérer ce béton comme un béton fluide ; en effet c'est un béton ordinaire avec des dosages d'une formulation d'un BAP.

Pour le BAP5 et le BAP 6, Les valeurs d'étalement sont supérieures à 550 mm. Ces bétons sont considérés comme des BAP c.-à-d. la quantité de SP a été suffisante pour défloculer toutes les grains de ciment.

Pour le BAP2 (1.5% S1) la valeur de l'étalement est de 530mm. Cette valeur est inférieure aux spécifications (550 mm) et ne suffit pas pour considérer le béton en tant que béton autoplaçant. Ceci est expliqué par l'insuffisance du dosage en SP qui ne permet pas de défloculer tous les grains de ciment, la quantité d'eau libérée est donc insuffisante pour l'obtention de la fluidité désirée. Par contre pour le BAP3, dosé à 2% de SP, l'étalement atteint 670 mm. L'augmentation du dosage en SP a permis une plus grande défloculation des grains de ciment, la quantité d'eau libérée dans le béton est donc plus importante.

Mesure de la vitesse d'écoulement

Pour la vitesse d'écoulement, toutes les valeurs sont comprises entre 3 à 5 secondes sauf le BAP1.

Mêmes interprétations données pour l'essai d'étalement, sont données pour la mesure de la vitesse d'écoulement.

Essai de stabilité au tamis

Les résultats de l'essai de la stabilité au tamis permettent de qualifier les BAP 1, 2, et 3 comme étant des bétons stables, le pourcentage de laitance étant inférieur à 15% pour les deux bétons. Cette stabilité est assurée d'une part par l'importante quantité de mortier (sable + ciment) que contient le béton autoplaçant et d'autre part par la faible quantité d'eau utilisée.

Pour le BAP 6, le pourcentage de laitance étant supérieur à 15%, le béton est considéré dans un état critique, cela revient aux quantités excès de superplastifiant et aussi à l'absence de l'agent de viscosité.

L'augmentation de superplastifiant a une influence négative sur la stabilité du mélange (la viscosité).

A noter que la valeur de BAP 7 se situe à la limite de l'intervalle des bétons stables cela revient au dosage élevé du superplastifiant.

4.3.1.2 Effet de type de superplastifiant

Le type de superplastifiant a une influence sur les propriétés rhéologiques des BAP. Un même dosage des 02 superplastifiants donne des étalements différents (BAP2 et BAP5, BAP3 et BAP6). Cela est dû à la structure chimique, l'efficacité de l'influence de chaque type et

l'ampleur de ses impacts sur la fluidité des mélanges et surtout avec le dosage de saturation de chaque type de superplastifiant.

4.3.1.3 Effet de la quantité d'eau

La réduction de la quantité d'eau influe négativement sur l'affaissement des bétons quel que soit le type de superplastifiant ; cela s'explique tout simplement que l'eau permet d'augmenter la fluidité du béton et sa réduction va réduire l'affaissement.

Au contraire, la réduction de la quantité d'eau est accompagnée d'une réduction de la quantité de laitance c.-à-d. un rapport E/C réduit donne une meilleure stabilité à cause de l'augmentation de la viscosité du béton.

4.3.2 Propriétés mécaniques

Les essais d'écrasement effectués ont montré que les bétons autoplaçants avec un superplastifiant ont une meilleure résistance que le béton sans dosage en superplastifiant. Celle-ci augmente légèrement avec le dosage du superplastifiant (figure VII.8) quel que soit le type de superplastifiant du fait que la présence d'adjuvant diminue la porosité, et donc augmente la compacité du béton.

4.3.2.1 Effet de type et de dosage de superplastifiant:

Comme on a déjà dit précédemment, le type de superplastifiant affecte les résultats obtenus ; chacun des deux superplastifiants a de caractéristiques différentes qui donnent des résultats différents.

4.3.2.2 Effet de la quantité d'eau

Lors du durcissement, l'eau s'évapore du matériau laissant des vides, les vides présents dans le béton représentent la porosité. Donc l'augmentation de la quantité d'eau crée un volume de vides plus important, ce qui engendre une plus grande porosité et une compacité plus faible.

La diminution de la quantité d'eau du béton accroît la compacité du matériau, diminue sa porosité ce qui donne une meilleure résistance mécanique.

Dans notre cas pour une diminution de la quantité d'eau de 15%, on note un accroissement de la résistance à 28 jours de 12.5% pour le superplastifiant S1 et de 7.5% (par rapport au BAP3) pour le superplastifiant S2 (par rapport au BAP6).

4.4 Conclusion

D'après les résultats obtenus précédemment, on peut dire qu'effectivement les bétons autoplaçants ont de meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques que les bétons ordinaires. Mais leur comportement est influencé par différents paramètres.

Dans cette étude on a vu l'effet :

- De la présence du superplastifiant.
- Du dosage en superplastifiant.
- De la différence d'influence entre deux (02) superplastifiants.
- Du rapport eau/ciment.

Cette étude nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- Il est possible de confectionner un béton à la fois : fluide, stable, homogène et résistant c'est le béton autoplaçant (BAP).
- Les BAP présentent de meilleures performances que celles des bétons ordinaires, ils se caractérisent par :
 - Une grande fluidité qui permet une mise en place facile.
 - Une bonne stabilité : résistance à la ségrégation et au ressuage.
 - Une parfaite homogénéité.
 - De meilleures résistances mécaniques (faible porosité).
- L'effet du superplastifiant dépend de la nature de ce dernier et surtout de son plage de dosage.
- La diminution du dosage eau/ciment en présence du superplastifiant augmente considérablement la résistance du BAP.

Conclusion générale

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel. Leur utilisation est notamment simplifiée par la suppression de la vibration et permet de réaliser des ouvrages d'une grande qualité esthétique. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière. Les propriétés des BAP ont été abordées dans la partie bibliographique.

Pourtant, bien que ces avantages soient tangibles et que l'intérêt qu'ils suscitent chez les industriels soit grandissant, les BAP demeurent en dessous de l'utilisation qui pourrait en être faite en raison de questions sans préponses posées par de nombreux maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvres. Certains des inconnues qui les concernent nécessitent donc d'apporter des résultats notamment en terme de comportement sous sollicitations extrêmes.

L'objectif de ce travail était donc de maîtriser la formulation ainsi que la caractérisation à l'état frais et durci.

La première partie de l'étude bibliographique résume les propriétés connues de ce matériau BAP en faisant une revue de littérature dans le domaine.

Quatre (04) mesures ont été exposées pour la caractérisation de BAP à l'état frais et durci : l'essai d'étalement, mesure de la vitesse T_{50} , essai de stabilité au tamis et la résistance mécanique à la compression à 28 jours.

Les résultats obtenus durant cette étude sont :

- La différence des propriétés rhéologiques et mécaniques entre les BAP est associée aux différences de formulation (différence du dosage et de type de superplastifiant et le rapport eau/ciment).
- L'utilisation du superplastifiant dans les formulations des bétons autoplaçants peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique en compression (meilleure hydratation du ciment dont la surface spécifique augmente suite à la défloculation).

Une fois cette étude achevée, nous pouvons recommander les actions suivantes à prendre comme pistes de recherche :

- Vu l'influence du superplastifiant marquée dans notre étude, nous proposons une étude approfondie de son influence chimique sur le processus d'hydratation et les résistances.
- L'utilisation des ajouts minéraux locaux pour obtenir un BAP moins chère et plus stable.
- Etudier en plus des performances rhéologiques et mécaniques d'autres axes, Ex : les changements de température et la durabilité.

Références bibliographiques

1. **El Hilali, A.** Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des BAP : influence des fines calcaires et des fibres végétales. *Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France.* 2009.
2. **Thierry, S.** Rhéologie et rhéométrie des bétons: application aux bétons autonivelants. *Thèse de Doctorat, LCPC.*
3. **Yin, J., et al., et al.** Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash.
4. **AFGC.** Recommandations de AFGC : bétons autoplacants. 2000.
5. —. Recommandations de AFGC : l'emploi des Bétons autoplacants. 2008.
6. **Khayat, K.H.** Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bareffect of anchored bars cast with fluid concrete. *A.C.I. Mat J, 95(2).* pp. 158-167.
7. **Michel, F., Pierard, J., Courard, L. et Pollet, V.** Influence of physic-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances. *Proceedings of the fifth international RILEM symposium on SCC, Ghent, Belgium.* pp. 205-210.
8. **BATIMAG.** Revue spécial huitième salon BATIMATEC. Mai, 2005.
9. **Tabet, N.** Contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico-mécanique des bétons autoplacants fibres (BAPF). *Mémoire de Magistère, Université de M'hamed Bougara-Boumerdes.* 2012.
10. **Turcry, P.** retrait et fissuration des béton autoplacants : influence de la formulation. *Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes.* Février 2004.
11. **Sandrine, B.** Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplacants (BAP). *Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.*
12. **Assié, S.** Durabilité des bétons autoplacants. *Thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Toulouse.* 2004.

13. **Baron, J.,Olivier,J.,P.** *Les bétons : bases et données pour leur formulation*. 3e. Paris : Eyrolles, 1999.
14. **Khayat, K.,H.,Guizani, Z.** Use of viscosity modifying admixtures to enhance stability of highly fluid concrete. *ACI Materials Journal*. 1997. Vol. 94, N°4.
15. **Holcim, B.** *Materials and applications*. [éd.] Center Holcim Western Europe. 1e. 2007.
16. **Perche, F.** Adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments. *Thèse de Doctorat, EPFL*.
17. **Aashto.** Portland cement concrete resistant to excessive expansion caused by Alkali-Silica. Section 56x. *Guide specification for highway construction, American Construction of State Highway and Transportation officials, Washington, D.C.* 2001.
18. —. Method of test for quality of water to be used in concrete. *American Construction of State Highway and Transportation officials, Washington, D.C.* 1979.
19. **Degeimbr, R.** *Technologie des bétons*. 2e. Université de liege.
20. **Haifi, M.R.** Formulation des bétons autoplacants (BAP). *Thèse de Magistère, Université Mentouri, Constantine*. 2012.
21. **Bombled, J.P. et Kalvenes, O.** Comportement rhéologique des pates, mortiers et bétons. *Revue des Matériaux de Construction, N°617*. 1967.
22. **Rougeau , P., Marry Dippe, Ch. et Francy, O.** Les BAP : synthèse des connaissances et campagne expérimentale. *CERIB*. Février 2001.
23. **Fares, H.** Propriétés mécaniques et physico-chmiques de béton autoplacants exposés à une température élevés. *Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise*. 2009.
24. **Aitcin, P.C., Jiang, S. et Kim, B.G.** L'interaction ciment-superplastifiant. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. Juillet-Aout 2002. Vol. 233: 87-96.
25. **Jin, J.** Propriétés des mortiers des BAP. *thèse de Doctorat, Université de London*. 2002.
26. **De Larrard, F., Catherine, C. et Deflorenne, F.** La nouvelle méthode des colis de l'afrem pour la formulation des béton hautes performances. *Bulletin de Liason des Ponts et Chaussées*. 1996. Vol. 202: 61-69.

27. **Ghezal, A.** Modélisation statique du comportement des BAP et optimisation. *Mémoire de maitrise en génie civil, Université de Sherbooke.* 1999.
28. **Amirat, N. et Boudouda, S.** Béton auto-plaçant : Contribution sur l'influence des matériaux locaux sur la composition et les propriétés rhéologiques et mécaniques. *thèse de Master, Université de Jijel.* 2013.
29. **Menai, Kh.** Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants. *Mémoire de maitrise, spécialité : Génie Civil, Université de Sherbooke, CANADA.* Septembre 1995.
30. **Bensebti, S.E.** Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux. *Thèse de Doctorat, Université de Mentouri, Constantine.* 2008.
31. **Dounane, N.** Etude de l'influence de différents types de fillers calcaires sur les performances du béton autoplaçant BAP. *Mémoire du Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, ALGER.* 2010.
32. **Michel, F.** Caractérisation physique des fillers calcaires. *Thèse DEA en Sciences Appliquées, Université de Liège.* Juin 2006.
33. **Rebbouh, N.** Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant . *Mémoire de Fin d'Etudes d'Ingéniorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.* 2006.
34. **Kazuhira et al.** Performance of new developed powder Polycarboxylic Acid Super plasticizer. [éd.] A. Sharendahi et Peterson. *In : RILEM, Proceeding pro7, Stockholm, Sweden.* 2003. pp. 425-430.
35. **Ouchi, M.** Self-compacting concrete. *University of technology Tosa-Yamada, Kochi, Japan.* 782-8502. pp. 26-36.
36. **Bouhamou, N., Belas, N. et MesbahH.** Etude de comportement à l'état frais des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux. *Article publié sur le site web des Presses scientifiques du CNRC.* 4 Juillet 2008. pp. 653-662.
37. **Bouchabou, Y. et Kherbouche, Y.** Caractéristiques des bétons autoplaçants à l'état frais et durci. *Mémoire du Master, Université de Jijel.* 2011.

38. **Abidelah, A., et al., et al.** Characterization of a self-compacting sand concrete using the quarry waste. *Article published on the NRC Research Press Web site*. 13 Novemver 2009. pp. 1773-1783.
39. **Turcry, Ph. et Loukili, A.** Différentes approches pour la formulation des BAP. *Revue française de génie civil* . 2003. Vol. 7 n°4.
40. **Boucheneb, Y.** Retrait plastique des bétons autoplacants. *Thèse de Magister, Université de Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou*. 2011.
41. **Khayat, K.H.** Workability, testing and performance of self-consolidating concrete. *ACI.Mat.J.,96(3),346-353*. 1999.
42. **Schwartzentruber, A. et Catherine, C.** La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)- Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés, *Matériaux et Structures*. Octobre 2000. Vol. 33, pp. 475-482.
43. **Haddad, O., et al., et al.** Extension de la méthode du mortier de béron équivalent aux bétons autoplacants. *Annales du batiment et travaux publics*. Octobre 2005. pp. 13-17.
44. **Abib, Z.** Formulation et caractérisation des bétons autoplacants. *Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Oran*. 2004.
45. **Khelifa, M.R.** Effet de l'attaque sulfatique externe sur la dutabilité des bétons autoplacants. *Thèse de Doctorat, Universités de Constantine et d'Orléans*. Juin 2009.
46. **Khayat, K.H.** Colloques sur les bétons autonivelants. *Centre de Recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université LAVAL Québec*. Novemvre 1996.
47. **Okamura, H. et Ozawa, K.** Self compactable high performance concrete in Japan. *ACI International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok,Thailand*. 1994.
48. **Hayakawa, M., Matsuoka, Y. et Yokota, K.** Application of super workable concrete in the construction of 70_story building in Japan. *ACI SP 154*. 1995.
49. **Izumi, I., Yonezawa, T. et Muta, A.** *Placing 10 000 m3 super workable concrete for guide track structure of retractable rof of Fukuoka Dome,Supplementary” Papers, 2nd*

CANMET \ ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas. 1995.

50. **El-Fodil, A.** Elaboration d'un béton autoplacant à base de fillers calcaires. *thèse d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, Ager.* 2009.

51. **Rasolofiharitiana, R.N.** Contribution à l'étude des bétons autoplacants. *thèse d'ingénieur.* Juin 2009.

52. **ERMCO.** The European guidelines for testing Self Compacting Concrete . *Specification, Production and Use.* 2005.

53. **Benkechkache, G.** Etude du comportement différé des bétons autoplacants. *Thèse de magistère en Génie Civil, Université de Mentouri, Constantine.* 2007.

54. **Trudel, A.** Maniabilité, Uniformité et Comportement Structural du Béton Autonivelant à Haute Performance. *Mémoire de Maîtrise Sciences Appliquées, Université de Sherbrooke, CANADA.* Avril 1996.

55. Spécification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, EFNARC. February, 2002.

56. **Josserand, L.** Ressuage des béton hydrauliques. *Thèse de Doctorat, LCPC.*

57. **Boukni, B.** Tenue au feu des Bétons Autoplacants. *Thèse de magister, Université Mentouri Constantine.* 2007.

58. **Thierry, S.** Les bétons autonivelants. *Bulletin LCPC 196, Réf.3889, 53-60.*

59. **Okamura, H. et Ouchi, M.** Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology.* April 2003. Vol. 1, N°1,5-15.

60. Bétons autoplacants-monographie d'ouvrages en BAP.Collection technique ciment de béton. 2003.

Liste des normes

- NF P 18-101 Granulats- Vocabulaire Définitions et classifications. Expérimental
Décembre 1990.
- NF P 18-553 Granulats- Préparation d'un échantillon pour essai. Expérimental
Septembre 1990.
- NF P 18-554 Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient
d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux.
Expérimental Décembre 1990.
- NF P 18-555 Granulats-Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et
teneur en eau des sables. Expérimentation Décembre 1990.
- NF P 18-560 Granulats : Analyse granulométrique par tamisage.
- NF P 18-573 Essai de Los Angeles. Expérimentale Décembre 1990.
- NF P 18-598 Equivalent de sable. Expérimental Octobre 1991.

ANNEXES ET FICHES TECHNIQUES

Sommaire :

Annexe A : Caractéristiques du ciment utilisé.

Annexe B : Fiche technique Superplastifiant MEDA FLOW 30.

Annexe C : Fiche technique Superplastifiant MEDA FLUID SF 150 .

Annexe D : Mode opératoire d'essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump Flow).

Annexe E: Mode opératoire d'essai de stabilité au tamis.

Annexe A : Caractéristiques du ciment.

Les ciments utilisés sont de type CEM II/A 42.5 provenant de l'usine de Sour El-Ghozlane, Wilaya de Bouira.

Les différentes caractéristiques que ce soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisée sont établies sur les fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même. Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux suivants :

Composition chimique

Composition chimique (%)								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	CaO libre	chlorures	Résidus insolubles
27.83	6.21	3.12	57.22	27.83	0.94	0.88	0.00	2.28

Composition minéralogique du clinker

Eléments	abréviation	Teneur (%)
Silicate tricalcique	C ₃ S	56.60
Silicate bicalcique	C ₂ S	22.98
Aluminate tricalcique	C ₃ A	9.87
Alumini-ferrite-tetracalcique	C ₄ AF	8.25

Propriétés physiques du ciment

Temps de prise		Expansion de chatelier		Surface spécifique (cm ² /g)	Consistance normal
Début	Fin	A chaud	A froid		
2h 50 min	4h 06 min	2.9	1.65	3891	26.91

Résistance mécanique du ciment

Essais	Age		
	02 jours	07 jours	28 jours
Compression (bars)	143.2	266.4	433.1
Flexion (bars)	35.7	58.3	77.9

MEDAFLOW 30

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

**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau**

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

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

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

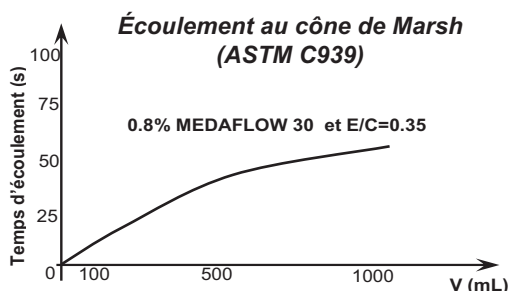
DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :
Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

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

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

MEDAFLOW 30

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubiténaire 1100kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



MEDAFLUID SF150

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1, TAB 3.2 ET TAB 7

Superplastifiant / Haut réducteur d'eau Accélérateur de durcissement

DESCRIPTION

Le **MEDAFLUID SF150** est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Son utilisation dans le béton permet d'accélérer le durcissement du béton d'une manière significative.

Il est compatible avec tous les types de ciment et se dilue parfaitement dans l'eau de gâchage.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons préfabriqués
- Bétonnage par temps froid
- Coulis d'injection
- Bétons prêts à l'emploi
- Bétons pompés
- Bétons coffrage tunnel

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLUID SF 150** permet:

Sur béton frais :

- Améliorer l'ouvrabilité à rapport E/C constant (pour un béton témoin ayant un slump de 3 à 8 cm **MEDAFLUID SF150** permet d'obtenir un slump de 12 à 15 cm)
- de diminuer la ségrégation
- Réduire le début de durcissement

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques
- Augmenter la cohésion granulats ciment

Désignation	Rc (MPa)		
	1J	7J	28J
MEDAFLUID SF150 1.5%	13	28,5	46,7

Résistances mécaniques en compression

(Béton confectionné sur chantier, dosé à 350 kg/m³.
E/C = 0,35 et Aff. = 11 cm

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 9.5 – 10,5
- Densité 1,19 ± 0,01
- Teneur en chlore <0, 1g/L
- Extrait sec 38%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLUID SF150** peut être ajouté dans la bétonnière à la confection du béton ou dans les camions malaxeurs :

a) Dans la bétonnière il s'ajoute mélangé à l'eau de gâchage lorsque le béton est déjà mouillé avec 50 à 70% de l'eau de mélange et doit être suivi d'un malaxage d'environ 3 minutes.

b) Dans le camion malaxeur, le **MEDAFLUID SF150** est introduit dans la toupie à l'arrêt et malaxé à grande vitesse pendant environ 1 minute par mètre cube de béton.

DOSAGE

A titre indicatif un dosage à 1.5% réduit le début de prise d'une heure (selon le type de ciment) par rapport au témoin :

Le dosage du **MEDAFLUID SF150** varie entre 1,0% et 1,5% du poids du ciment soit 0,85 à 1,25 litre pour 100 Kg de ciment.

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

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLUID SF150** est conditionné en bidons de 12 kg, fût de 270 kg, cubitenaire 1200 kg.

Délai de conservation :

1 année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



MEDAFUID SF150

et de la chaleur.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Mai 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Annexe D : Mode opératoire d'essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump Flow).

1. Objet de l'essai

Caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné.

2. Appareillage

Table d'étalement : table mobile, comportant un plateau plan et carré d'au moins 900mm de côté, qui est destiné à recevoir le béton.

Cône d'Abrams : moule en métal non directement attaqué par la pâte de ciment, d'une épaisseur min. de 1,5mm. La paroi intérieure du moule doit être lisse. Le moule doit avoir la forme d'un tronc de cône creux aux dimensions intérieures suivantes :

- Diamètre de la base : (200 ± 2) mm.
- Diamètre du haut : (100 ± 2) mm.
- Hauteur : (300 ± 2) mm.

Entonnoir : conçu en matériau non absorbant et non directement attaqué par la pâte de ciment, ayant un collier permettant à l'entonnoir d'être placé correctement sur le cône d'Abrams.

Règle, graduée de 0 à 900 mm, avec des graduations de 5 mm.

Seau : d'une capacité minimale de 10 litres et muni d'un bec verseur.

3. Mode opératoire

- Mettre le plateau sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque.
- Placer le cône au centre du plateau.
- Prélever un échantillon représentatif du béton.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir.
- Remplir le cône en déversant le béton de manière continue jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire avec une truelle et nettoyer la plaque avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.

- Une fois le béton étalé, mesuré (au centimètre le plus proche) le diamètre final sur deux cotés perpendiculaires.
- Si les deux valeurs sont différentes de plus de 5cm, l'essai est invalide et reconduit.
- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.

Annexe E : Mode opératoire d'essai de stabilité au tamis.

1. Objet de l'essai

Qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation.

2. Matériel nécessaire

Le matériel utilisé est le suivant :

- Seau de 10 l muni d'un bec verseur + couvercle.
- Tamis (toile à mailles carrées) 5 mm, diamètre de 315 mm + fond.
- Balance : précision minimale 20 g, portée minimale 20 kg.
- Minuterie ou horloge.
- Main écope.

3. Mode opératoire

- Prélever un échantillon de béton Le prélèvement est réalisé à l'aide d'un seau directement à la goulotte du mixer. Le seau doit être rempli à raison d'au minimum 9 litres de béton. L'échantillon global doit être ré-homogénéisé à la main écope avant de constituer l'échantillon réduit (remplissage du seau).
- Attendre 15 minutes.
- Peser le fond et le tamis à vide.
- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau après les 15 minutes.
- Verser sur le tamis une quantité de béton égale à $(4,8 \pm 0,2)$ kg ; verser ce béton au centre du tamis : hauteur de chute du béton de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$.
- Noter immédiatement la masse réelle de l'échantillon de béton versé sur le tamis P échantillon.
- Attendre 2 minutes.
- Retirer le tamis ainsi que le fond et remettre la balance à zéro.
- Peser le fond avec la laitance P fond + laitance.
- Déterminer $P \text{ laitance} = P \text{ fond} + \text{laitance} - P \text{ fond}$
- Calculer le pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon : $(P \text{ laitance} / P \text{ échantillon}) \times 1000$. Le résultat est arrondi à l'entier le plus proche.