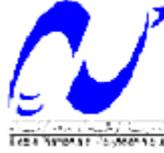


Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique  
*Ecole nationale Polytechnique*



وزارة التعليم العالي  
والبحث العلمي  
المدرسة الوطنية المتعددة التكنولوجيات

**Département de Génie Civil**

**Mémoire de Fin d'Etudes**

**En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil**

**Formulation et caractérisation d'un béton  
autoplaçant**

Thème proposé et dirigé par :  
**Mme A. CHIKH**

Etudié par :  
**Melle Naima REBBOUH**

**Promotion 2005-2006**

## **Remerciements**

*Je remercie Madame A. CHIKH, ma promotrice, pour l'aide qu'elle a apportée à la réalisation de ce travail et pour ses précieux conseils.*

*Mes remerciements vont également aux responsables et personnels du Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP- Hussein Dey), en particulier à Monsieur HADID pour sa précieuse aide et Monsieur MEZAACHE, le chef de département du laboratoire, pour son accueil bienveillant.*

*Je remercie aussi les responsables du Centre National d'Etudes et de Recherche Intégrées du Bâtiment (CNERIB-Souidania), en particulier notamment Monsieur BRARA, le chef de département Matériaux et Composants.*

*Mes remerciements vont aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail.*

*Je tiens aussi à remercier ma famille et toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **PARTIE I: ETUDE THEORIQUE**

### **Chapitre I : Le béton autoplaçant : définitions et propriétés.....5**

I.1 Définition d'un béton autoplaçant .....	<b>5</b>
I.2 Historique .....	6
I.3 Cahier des charges d'un BAP .....	6
I.4 Spécificité de la composition d'un béton autoplaçant .....	8
I.4.1 Une grande proportion en fines .....	8
I.4.2 Un volume de pâte important .....	8
I.4.3 Ajout de superplastifiant et de rétenteur d'eau (agent de viscosité) .....	8
I.4.4 Faible volume en gravillons .....	9
I.5 Les composants d'un BAP.....	9
I.5.1 Les granulats .....	9
I.5.2 Le liant.....	10
I.5.2.1 Le ciment .....	10
I.5.2.2 Les ajouts minéraux.....	10
I.5.3 L'eau.....	14
I.5.4 Les ajouts chimiques .....	14
I.6 Relation entre les différentes propriétés d'un BAP .....	20

### **Chapitre II : Formulation d'un béton autoplaçant.....23**

II.1 Principes de formulation .....	23
II.2 Différentes approches pour la formulation des BAP .....	24
II.2.1 L'approche suédoise .....	25
II.2.2 L'approche de la JSCE .....	25
II.2.3 Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC .....	27
II.2.4 Formulation par volume de pâte minimal .....	28
II.2.5 Formulation par optimisation du squelette granulaire .....	30
II.2.6 Méthode basée sur un plan d'expérience.....	32
II.3 Exemples de formulations .....	33
II.4 Analyse de quelques approches.....	33
II.4.1 Analyse de l'approche japonaise .....	33
II.4.2 Analyse de la méthode du volume minimal de la pâte.....	34
II.4.3 Analyse de l'approche par optimisation du squelette granulaire.....	34
II.5 Conclusion .....	34

<b>Chapitre III : Caractérisation d'un béton autoplaçant.....</b>	<b>37</b>
III.1 Essais sur mortier frais .....	37
III.2 Essais sur béton frais .....	38
III.2.1 Essais de La fluidité.....	38
III.2.2 Mesure de la déformabilité, Essai du box .....	42
III.2.3 Essai de la stabilité.....	42

<b>Chapitre IV : Fabrication, transport et mise en place des BAP. ....</b>	<b>47</b>
--	-----------

## **PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE**

<b>Chapitre V : Objectifs de l'étude.....</b>	<b>50</b>
<b>Chapitre VI : Procédure expérimentale.....</b>	<b>53</b>
VI.1 Identification des matériaux.....	53
VI.1.1 Essais sur granulats.....	53
VI.1.1.1 Echantillonnage (NF P18-553) .....	53
VI.1.1.2 Analyse granulométrique.....	53
VI.1.1.3 Densités (absolue et apparente) .....	55
VI.1.1.4 Coefficient d'absorption et Porosité (NF P18-554) .....	55
VI.1.1.5 Propreté superficielle (NF P18-591) .....	55
VI.1.1.6 Coefficient de forme .....	56
VI.1.1.7 Coefficient Los Angeles (NF P 18-573) .....	56
VI.1.1.8 Coefficient Micro Deval (NF P 18-572) .....	57
VI.1.2 Essais sur sable .....	57
VI.1.2.1 Module de finesse (NF P18-304) .....	57
VI.1.2.2 Equivalent de sable (NF P18-598) .....	58
VI.1.3 Essais sur ciment .....	58
VI.1.3.1 La résistance mécanique du ciment (NF EN 196-1).....	58
VI.1.3.2 Le temps de prise (NF P15-473) .....	59
VI.1.3.2 Analyse chimique .....	59
VI.1.4 caractéristiques des ajouts.....	60
VI.1.4.1 Le superplastifiant .....	60
VI.1.4.2 La fumée de silice .....	61
VI.2 Elaboration des bétons.....	61
VI.2.1 Formulation d'un béton ordinaire.....	65

VI.2.2 Formulation d'un béton autoplaçant.....	65
VI.2.2.1 Formulation du béton autoplaçant sans fumée de silice.....	65
VI.2.2.1 Formulation du béton autoplaçant avec fumée de silice.....	65
VI.2.3 préparation de la gâchée.....	68
VI.2.4 conservation des éprouvettes.....	68

**Chapitre VII : Essais sur bétons : résultats et interprétations..... 70**

VII.1 Essais sur bétons frais .....	70
VII.1.1 Essai au cône d'Abrams .....	70
VII.1.2 Essai de la boîte en L.....	71
VII.1.3 Essai de la stabilité au tamis.....	72
VII.2 Essais sur bétons durci .....	73
VII.2.1 Essai de compression (NF P 18-406) .....	73
VII.2.2 Essai de traction par flexion (NF P 18-407) .....	74
VII.2.3 calcul de la porosité.....	74
VII.2.4 Récapitulatif des résultats.....	76
VII.2.5 Observations visuelles .....	76
VII.3 Discussion et interprétation des résultats : .....	76
VII.3.1 Propriétés rhéologiques .....	78
VII.3.1.1 Effet du superplastifiant .....	78
VII.3.1.2 Effet de la variation de la quantité d'eau .....	78
VII.3.1.3 Effet de l'ajout minéral .....	78
VII.3.2 Propriétés mécaniques.....	78
VII.3.2.1 Effet du superplastifiant .....	78
VII.3.2.2 Effet de la variation de la quantité d'eau .....	80
VII.3.2.3 Effet de l'ajout minéral .....	81
VII.4. Conclusion.....	82

**CONCLUSION GENERALE**

**ANNEXES**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Différents types d'adjuvants pour béton. ....	16
Tableau II.1 : Cahier des charges d'un BAP.....	32
Tableau II.2 : Exemples de formulations de BAP. ....	33
Tableau III.1 : exemple de corrélation entre l'étalement au cône d'Abrams et l'étalement au cône DIN.....	39
Tableau VI.1 : Analyse granulométrique du gravier 5/15.....	54
Tableau VI.2 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	54
Tableau VI.3 : Analyse granulométrique du sable (0/3).....	54
Tableau VI.4 : densités apparente et absolue des granulats. ....	55
Tableau VI.5 : coefficient d'absorption et porosité.....	55
Tableau VI.6 : propreté superficielle.....	55
Tableau VI.7 : coefficient de forme.....	56
Tableau VI.8 : résistance à la fragmentation (LA).....	56
Tableau VI.9 : résistance à l'usure (MDE).....	57
Tableau VI.10: module de finesse du sable.....	57
Tableau VI.11: valeur de l'équivalent de sable.....	58
Tableau VI.12: différentes classes de ciment.....	58
Tableau VI.13: composition chimique du ciment.....	59
Tableau VI.14: composition minéralogique du ciment.....	60
Tableau VI.15 : composition chimique de la fumée de silice.....	61
Tableau VI.16 : composition du béton témoin.....	63
Tableau VI.17 : composition du mélange.....	64
Tableau VI.18 : composition des BAP1 et BAP2.....	65
Tableau VI.19 : composition du BAP3.....	66
Tableau VI.20 : composition d'un BAP avec 10% de fumée de silice.....	67
Tableau VII.1 : résultats de l'essai au cône d'Abrams.....	71
Tableau VII.2: essai de la boîte en L.....	72
Tableau VII.3: résultats de l'essai de la stabilité.....	72
Tableau VII.4 : résistance à la compression des bétons étudiés.....	74
Tableau VII.5 : résistance à la traction des bétons étudiés.....	75
Tableau VII.6 : Mesure de la porosité à 28 jours :.....	75
Tableau VII.7 : récapitulatif des résultats d'essais effectués sur différents types de bétons.....	76

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Phénomène de blocage des armatures.....	7
Figure I.2 : mécanisme d'action du superplastifiant.....	17
Figure I.3: variation de la capacité de remplissage en fonction .....	21
Figure II.1 : variation de $V_{bi}$ en fonction de $e/d_i$ .....	29
Figure III.1 : Montage pour mesurer de la résistance au cisaillement d'un mortier...	37
Figure III.2: résultat de l'essai.....	38
Figure III.3 : essai d'étalement.....	39
Figure III.4 : Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring). .....	40
Figure III.5: boîte en L.....	41
Figure III.6 : Essai de l'entonnoir en forme de V d'après SAKATA. ....	42
Figure III.7 : Essai du tassement (MANAI ,1995).....	43
Figure III.8 : Essai de la stabilité au tamis. ....	44
Figure III.9 : Essai du tube en U. ....	44
Figure III.10 : Essai du caisson.....	45
Figure VII.1 : étalement d'un BAP et Figure VII.2 : essai d'étalement .....	70
Figure VII.3: boîte en L .....	71
Figure VII.4 : essai de stabilité au tamis .....	72
Figure VII.5 : essai de compression. ....	73
Figure VII.6: traction par flexion.....	74
Figure VII.7 : résistances à la compression .....	78
Figure VII.8 : résistances à la compression .....	79
Figure VII.9: influence du dosage en eau sur la résistance .....	80
Figure VII.10 : porosité (à 28 jours) des différents bétons élaborés .....	80
Figure VII.11 : influence de la présence et du dosage de la fumée de silice .....	81

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, le béton doit répondre à des exigences toujours plus sévères en matière de performances mécaniques, de durabilité, d'ouvrabilité, d'environnement et d'aspect. La technologie du béton ne cesse dès lors de se compliquer. On a ainsi assisté à l'émergence de bétons spéciaux tels que les bétons à haute résistance, les bétons autocompactants (autoplaçants) et les bétons recyclés.

Le béton autocompactant est une des avancées technologiques majeures de ces dernières années, dans le monde du béton. Apportant une aisance dans la mise en œuvre, ce matériau est encore méconnu. La technique du béton autocompactant fait aujourd'hui l'objet de toutes les attentions.

Le béton autocompactant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable, il est capable de se mettre en place sous l'effet de la gravité, sans apport d'énergie extérieure (vibration). Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes et permet ainsi la réalisation de formes compliquées ou d'ouvrages à densité d'armatures élevée tout en présentant généralement des surfaces de meilleure qualité.

Ce béton ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. La formulation des bétons autoplaçants (BAP) nécessite de disposer d'un cahier des charges précis sur les performances à obtenir sur le béton à l'état frais et à l'état durci.

Les bétons autoplaçants se caractérisent en général par une formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportions bien précises pour satisfaire les exigences de maniabilité et de stabilité.

Le béton autoplaçant présente des avantages multiples, du point de vue économique et technique, on cite :

- un gain de productivité : une nouvelle organisation de chantier ou de l'atelier adaptée à ces bétons permet de diviser jusqu'à deux la durée de fabrication des pièces.
- une amélioration des conditions de travail : simplification de la mise en œuvre, amélioration de la sécurité, réduction des nuisances sonores dues à la vibration sur et autour du chantier.
- une amélioration des qualités de parement.
- un gain de maintenance : la suppression de la vibration diminue les sollicitations sur les moules, ce qui ralentit l'usure du matériel.
- Ce béton présente un avantage évident partout où la vibration s'avère difficile à réaliser : voiles de grande hauteur, formes complexes, parties d'ouvrages fortement ferrillées.
- un enrobage optimal des armatures et un remplissage parfait des coffrages.

Cependant, l'enthousiasme que suscite la mise en place rapide et moins pénible des BAP ne doit pas occulter la rigueur nécessaire à la fabrication et à la mise en œuvre. De son élaboration jusqu'à sa mise en service, le béton passe par 3 étapes différentes : état fluide, état au jeune âge, et état durci.

A l'état frais le béton doit assurer la facilité de la mise en œuvre ainsi qu'une grande capacité de remplissage, celle-ci doit fournir les caractères rhéologiques visés à savoir : un béton homogène, stable et uniforme.

Au jeune âge le béton doit garantir une résistance suffisante pour permettre le décoffrage, et éviter les fissures causées par le retrait et le dégagement de chaleur.

Une durée de vie prolongée de la structure, des performances mécaniques donc une résistance élevée et une perméabilité minimale sont certifiées pour ce béton à l'état durci.

L'étape du béton à l'état frais est la plus importante mais aussi la plus délicate. Les conditions sur chantier diffèrent des conditions au laboratoire : sur chantier il est plus difficile de garantir les performances voulues, un excès ou un manque de vibration peut provoquer une ségrégation importante.

En conséquence il est nécessaire de disposer d'une main d'œuvre qualifiée, d'un chantier organisé, et d'une bonne coordination entre le concepteur et l'exécuteur des travaux.

C'est de là qu'est venue l'idée de produire un béton fluide, qui a l'aptitude de se mettre en place sans vibration, tout en assurant de bonnes propriétés rhéologiques et mécaniques.

L'objectif de ce travail, est d'aboutir à une méthode de formulation d'un béton autoplaçant, et de comparer ses performances à celles d'un béton ordinaire vis-à-vis du comportement rhéologique et de la résistance.

On verra aussi l'influence des ajouts minéraux, plus précisément de la fumée de silice, à différents dosages, sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci.

Ce mémoire comportera deux parties :

- ◆ Une partie théorique : qui est une synthèse bibliographique de la littérature spécialisée. Elle englobe la définition d'un béton autoplaçant, de ses composants, des propriétés recherchées. Les méthodes de formulation d'un BAP, les essais de caractérisation à l'état frais et à l'état durci, ainsi que le processus d'élaboration et de transport y sont également développés.

- ◆ Une partie expérimentale : qui présente l'ensemble des essais effectués au Laboratoire Central de Travaux Publics (LCTP), leur principe et leur mode opératoire. Un récapitulatif des méthodes de formulations adoptées dans cette recherche et des essais effectués sur béton y est exposé.

Bien entendu les résultats des essais effectués au laboratoire sont présentés et suivis d'une interprétation et d'une conclusion générale.

# **PARTIE 1 : ETUDE THEORIQUE**

## **Chapitre I :**

### **Le béton autoplaçant : définitions et propriétés.**

# Chapitre I : Le béton autoplaçant : définitions et propriétés.

## Introduction

Les bétons autocompactants 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'avantage.

Le béton autocompactant est également dénommé béton autoplaçant pour les parois verticales, ou encore autonivelant pour les parois horizontales, mais l'appellation la plus courante en Algérie est : béton autoplaçant notée BAP. [1]

Ce premier chapitre fait l'objet d'une initiation au béton autoplaçant, il comporte des notions fondamentales relatives aux caractéristiques des BAP.

## I.1 Définition d'un béton autoplaçant

Le béton autoplaçant se distingue principalement du béton ordinaire par ses propriétés à l'état frais. En effet, le béton autoplaçant est un béton fluide et parfaitement homogène qui se met en place sans vibration. Il est capable de s'écouler sous son propre poids quel que soit le confinement du milieu et reste homogène au cours l'écoulement et une fois mis en place (absence de ségrégation dynamique et statique).

Grâce à son homogénéité, sa résistance à la ségrégation, et sa stabilité ce béton garantit des structures résistantes et durables.

Pour obtenir un béton fluide il ne s'agit pas d'ajouter de l'eau, au contraire, une telle manipulation conduit à des phénomènes de ségrégation entraînant une chute des performances. Il s'agit de trouver la composition optimale entre les différents constituants (gravier, sable, ciment, eau, ajouts et adjuvants), et de garantir l'absence de ségrégation et de ressuage.

Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des bétons ordinaires. Ils comportent un fort dosage en sable, en ciment et en éléments fins, ainsi que des ajouts chimiques et minéraux qui permettent de modifier leurs propriétés. Les granulats utilisés doivent être de diamètre limité pour prévenir la formation des voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. [2,3,4]

## I.2 Historique

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux à haute performance qui se caractérisent essentiellement par leur fluidité à l'état frais et leur homogénéité à l'état durci.

Ces bétons ont la capacité de se mettre en place sous l'effet de la gravité, sans apport de vibration même dans les coffrages très ferrailés.

L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été rapidement reprise par les grands groupes industriels Japonais (Kajima, Taisei, Obayashi, etc.) pour des projets d'envergure.

L'essor important de ce type de bétons se justifie par le fait qu'ils présentent deux intérêts technico-commerciaux :

- facilité de mise en place : diminution du temps de réalisation, diminution du personnel donc du coût de la main-d'œuvre ; ainsi que la possibilité d'utiliser des coffrages de formes complexes et de forte densité d'armatures.
- amélioration de la qualité du béton (résistance et durabilité), qui est indépendante du savoir-faire des ouvriers.

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

Les chercheurs et les industriels Japonais n'ont pas tout de suite publié leurs recherches. La viabilité des bétons autoplaçants devait être prouvée. Plusieurs équipes de recherche et de développement s'y sont consacrées. Des réalisations en vraie grandeur ont confirmé le travail mené au Japon depuis plus de dix ans.

Le challenge actuel consiste à maîtriser la formulation du béton autoplaçant dans plusieurs classes de résistance pour un prix compétitif, en prenant en compte d'une part le cahier des charges intégrant les performances rhéologiques et d'autre part les techniques et matériaux disponibles.[5,6,7]

## I.3 Cahier des charges d'un BAP

La spécificité des BAP réside dans leur comportement à l'état frais. En effet ce type de béton doit se caractériser par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en restant stable. Ces propriétés contribuent à assurer des structures durables et de qualité. [5]

Le cahier des charges suivant décrit les propriétés rhéologiques exigées pour un BAP :

un BAP doit avant tout s'écouler (se mettre en place) sous son poids propre, et avec un débit suffisant en milieu infini (dalle par exemple), le béton se comportant comme un fluide binghamien, cela se traduit par un seuil de cisaillement et une viscosité plastique faibles. L'écoulement doit se faire sans apport de vibration, au travers de zones confinées et coffrages complexes.

le béton doit présenter une bonne résistance à la ségrégation dynamique pour rester homogène. En phase d'écoulement dans une zone confinée, si le mortier n'est pas assez résistant, les gravillons peuvent le cisailer. Ils ont tendance à venir au contact les uns des autres, ainsi il y a formation de voûtes par contacts solides, qui en se colmatant avec des parties fines interrompent l'écoulement (Figure I.1).

une bonne résistance à la ségrégation statique, au tassement et au ressuage: une fois mis en place jusqu'à sa prise, le béton doit avoir une bonne résistance à la ségrégation pour garder son homogénéité. Le tassement et le ressuage sont aussi à éviter, car ils génèrent une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage. possibilité de pompage.

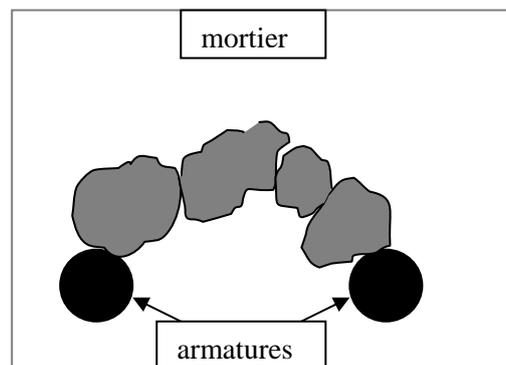


Figure I.1 : Phénomène de blocage des armatures.

La formulation de ce type de bétons n'est pas aussi simple que dans le cas des bétons ordinaires car il s'agit de concilier deux propriétés contradictoires : **la fluidité et la stabilité**. [7]

L'avantage des bétons autoplaçants est d'améliorer la déformabilité du mélange pour faciliter sa mise en place (sans apport de vibration), tout en gardant une bonne stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage). Pour cela il est nécessaire d'ajouter un agent de viscosité, d'augmenter la quantité des ajouts minéraux, et de choisir des teneurs appropriées de sable et de granulats.

La composition de la pâte de ciment est aussi importante que la composition du béton lui-même, les deux influent sur son comportement rhéologique.

## **I.4 Spécificité de la composition d'un béton autoplaçant**

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques [8,9] :

- Grande proportion en fines.
- Volume de pâte important.
- Ajouts de super plastifiant et de rétenteurs d'eau (agent de viscosité).
- Faible volume en gravillons.

### **I.4.1 Une grande proportion en fines**

Le but de l'augmentation de la quantité de fines (qui peut atteindre environ  $500\text{kg}/\text{m}^3$ ) est d'assurer la maniabilité, de limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Il s'agit aussi de remplacer une quantité de ciment pour éviter l'élévation de température lors de la prise du ciment et diminuer la quantité de  $\text{CO}_2$  émise.

Les plus utilisées sont :

- les fillers calcaires (calcite, dolomite) : qui agissent comme des accélérateurs de prise, par la formation d'hydrates.
- les fillers siliceux.
- les fumées de silice.
- les cendres volantes.
- les laitiers de haut fourneau.

Ces deux derniers permettent d'obtenir un maintien d'ouvrabilité plus long.

### **I.4.2 Un volume de pâte important**

On entend par pâte le mélange : ciment, eau, additions et air occlus. Un volume de pâte important permet d'écartier les granulats les uns des autres, de diminuer les forces de frottements qui ont tendance à limiter l'étalement du béton, bloquer son passage dans les zones confinées et donc diminuer la capacité de remplissage des coffrages.

### **I.4.3 Ajout de superplastifiant et de rétenteur d'eau (agent de viscosité)**

Afin de modifier la fluidité d'un BAP il est nécessaire d'utiliser un superplastifiant, ce dernier augmente l'ouvrabilité du béton mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

Pour minimiser l'effet négatif du superplastifiant, on ajoute généralement un agent de viscosité (appelé aussi agent colloïdal).

L'agent de viscosité est un polymère qui interagit avec l'eau et rend la pâte plus visqueuse. [8]

#### **I.4.4 Faible volume en gravillons**

Lors de l'écoulement du béton dans des zones confinées, les gros granulats ont tendance à bloquer le passage et à interrompre l'écoulement du béton. Pour minimiser les risques de blocage, on opte pour des granulats de diamètre inférieur à 20mm (le diamètre maximal doit être compris entre 10 et 20 mm).

Pour les BAP le rapport massique gravier /sable est proche de 1, pour la forme des granulats on peut utiliser des granulats roulés ou concassés.

#### **I.5 Les composants d'un BAP**

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

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

En plus des granulats, la formulation d'un BAP se distingue par la présence d'un ajout chimique et /ou minéral. [9,6]

##### **I.5.1 Les granulats**

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

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

Cependant pour le sable, et face au problème de la surexploitation des gisements, il est préférable d'utiliser un sable concassé qu'un sable roulé.

Le sable concassé est un produit fini obtenu au bout d'une succession d'opérations de concassage appliquées à des roches extraites en carrière. Sa granulométrie peut être rendue quasi uniformément riche sur une étendue granulaire imposée par criblage, ce qui n'est pas le cas pour un sable roulé qui a une granulométrie presque mono granulaire. De plus, le sable concassé apporte au mélange une part non négligeable de fines qui améliorent la maniabilité, la compacité, la résistance et la durabilité du béton.

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

Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm.

## **I.5.2 Le liant**

Le liant est constitué de ciment auquel on ajoute des particules fines minérales qui correspondent à des additions normalisées ou non.

### **I.5.2.1 Le ciment**

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments, mais compte tenu des exigences de démoulage au jeune âge, le ciment le plus employé est le : CPA CEM I 52,5.

### **I.5.2.2 Les ajouts minéraux**

Les ajouts minéraux sont définis par la norme européenne provisoire ENV 206 'Béton. Performance, production, mise en œuvre et critère de conformité' comme suit : '*Matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières*'. [10]

Il faut préciser que les améliorations et les propriétés particulières sont évidemment autres que celles qu'apporterait une poudre de même finesse considérée comme simple granulat. [11,12]

L'utilisation des ajouts minéraux a des bénéfices : fonctionnels, économiques et écologiques. [9]

#### **Bénéfices fonctionnels**

- L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Elles diminuent la demande en eau (à l'exception des particules très fines qui augmentent la demande en eau vu leur grande surface spécifique).
- La substitution d'une quantité de ciment par des fines diminue la chaleur d'hydratation dégagée lors de la confection du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

#### **Bénéfices économiques**

- La majorité des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries.
- Le remplacement du ciment qui est un grand consommateur d'énergie par des ajouts minéraux permet de réduire le coût du béton.

#### **Bénéfices écologiques**

L'utilisation de ces sous produits permet de les éliminer de la nature, tout en diminuant la quantité de CO<sub>2</sub> émise par l'industrie cimentaire.

L'ajout minéral peut être sous forme de particules minérales fines qui correspondent à des additions normalisées ou non, ou des particules ultrafines telles que les fumées de silice.

#### **I.5.2.2.a Les fillers**

Ce sont des produits finement divisés utilisés comme des correcteurs granulométriques, provenant de roches massives ou meubles traitées de telle sorte qu'ils ne renferment pas plus de 20% d'éléments supérieurs à 125  $\mu\text{m}$  (P 18-541).

#### **I.5.2.2.b Le laitier de haut fourneau**

C'est un coproduit de la production de la fonte.

Dans le procédé de fabrication, dans les hauts fourneaux, le laitier surnage au dessus de la fonte, et se vitrifie rapidement après refroidissement. Le broyage de ce dernier (à environ 400  $\text{m}^2/\text{kg}$  à 500  $\text{m}^2/\text{kg}$ ) donne ce qu'on appelle le laitier vitrifié moulu. Il est utilisé comme ajout cimentaire s'il est conforme à la norme :

NF P 18-506 «Additions pour béton hydraulique. Laitier vitrifié moulu de haut fourneau».

La composition chimique du laitier est relativement constante, car pour permettre le refroidissement de la fonte la composition chimique des matières premières doit être bien ajustée. Tandis que sa composition minéralogique dépend de son mode de refroidissement, un laitier est d'autant plus vitreux que le refroidissement est rapide.

#### **I.5.2.2.c Les cendres volantes**

Il résulte de la combustion du charbon pulvérisé dans les centrales thermiques des composants volatiles du carbone et des impuretés minérales.

Les composants volatiles et le carbone sont brûlés, tandis que les impuretés minérales telles que l'argile, le quartz et les feldspaths sont fusionnés et entraînés vers la zone froide où ils se solidifient en de petites sphères vitreuses. La majorité de ces sphères sont emportées par le courant gazeux vers l'extérieur. Ces cendres sont récupérées dans un précipitateur électrostatique. Les cendres doivent être conformes à la norme NF EN 450 «Cendres volantes pour béton. Définitions, exigences et contrôle de qualité».

La composition chimique des cendres volantes dépend des impuretés contenues dans le charbon utilisé.

Pour la composition minéralogique, selon la teneur en CaO les cendres volantes se divisent en deux catégories

- classe F: contenant moins de 10% de CaO.
- classe C: contenant entre 15 % et 35% de CaO.

#### **I.5.2.2.d Les fumées de silice**

Les fumées de silice jouent un rôle particulier dans la formulation du béton du fait, d'une part, de leur composition (taux de silice supérieure à 70%), d'autre part, de leur finesse (supérieure à 10 000  $\text{m}^2/\text{kg}$ ).

### ❖ Définition

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.

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium métallique ou des différents ferroalliages contenant du silicium (comme : FeSi, CaSi)

Lors de la réduction du quartz en silicium dans un four à 2000 °C il y a production des vapeurs de SiO, au moment de leur passage par les parties les plus froides du four et dès leur contact avec l'air, ces vapeurs s'oxydent et se condensent sous forme de microsphères de silice.

Selon la norme, on distingue deux classes A et B : les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et les plus fines.

Compte tenu de leur très grande finesse et de leur très grande réactivité avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, la proportion des fumées de silices est limitée à 10% du poids de ciment. Leur emploi est réservé aux bétons contenant un superplastifiant. [10]

### ❖ Propriétés et mécanismes d'actions

Les fumées de silice se présentent sous forme de fines particules sphériques à structure vitreuse d'un diamètre moyen d'environ 0,1 µm. Leur surface spécifique est de 20 m<sup>2</sup>/g à 25 m<sup>2</sup>/g elles sont donc 100 fois plus fines que les grains de ciment. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 % à 95%.

La finesse et la forme vitreuse des fumées de silice font d'elles un produit très réactif, elles peuvent agir dans le béton selon trois mécanismes :

Effet pouzzolanique :

La finesse de ses particules lui permet de réagir rapidement avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former du C-S-H. On note alors une augmentation de la résistance au jeune âge (dès 7 jours).

Effet physico chimique :

La réaction chaux – fumées de silice permet aussi de diminuer la porosité du béton, et de le rendre plus compact et imperméable.

Effet physique :

Les vides présents entre les grains du matériau sont comblés par les particules ultrafines des fumées de silice, augmentant ainsi la compacité du mélange.

Plusieurs études (Bentur et Goldman 1989 ; Meland 1983 ; Buil et al 1984) révèlent que la présence de fumées de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment portland. En 1985 Hung Cheng -Yi & Feldman montrent que l'effet accélérateur est favorisé par la création de sites de germination des cristaux de portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> dès les premières minutes qui suivent le début de la réaction.

En 1989 Carles-Gibergues & al concluent que cet effet est plus marqué avec l'utilisation d'un fluidifiant. [10]

### ❖ Influence sur les propriétés rhéologiques du béton

À l'état frais, la présence d'une grande quantité de fines permet de diminuer le risque de ressuage et de ségrégation et d'assurer une meilleure stabilité. [11,13]

### ❖ Influence sur la teneur en eau et la porosité

Des essais sur mortier ont permis de montrer que la réduction de la teneur en eau, exprimé par la variation du rapport E/C varie en fonction de la teneur en fumées de silice. L'effet réducteur d'eau est optimal pour un dosage en fumée de silice de l'ordre de 15 à 20% de la masse du ciment. La porosité des mortiers est minimale pour un dosage de 20%, sa réduction est de 21 à 16,5%.

### ❖ Influence sur les propriétés du béton durci

L'emploi des fumées de silice permet de diminuer la porosité du béton et d'augmenter son imperméabilité, de plus, il réduit la quantité de chaleur développée dans le béton ce qui permet de minimiser le risque de fissuration.

Les propriétés apportées par les fumées de silice améliorent la résistance du béton, mais il semblerait que cette amélioration dépend de plusieurs paramètres :

- Composition et coefficient d'activité de la fumée de silice.
- Composition minéralogique et classe de résistance du ciment.
- La façon de sa prise en compte dans le béton (substituant ou ajout).

Les expériences effectuées sur plusieurs types de mortiers en faisant varier les paramètres étudiés ont permis de montrer que :

- Les fumées de silice utilisées en substituant le ciment augmentent la résistance à court terme, mais le rapport Eau/Liant doit rester inchangé, pour cela, l'ajout d'un superplastifiant est nécessaire pour assurer la maniabilité recherchée.
- Cette augmentation de la résistance est d'autant plus grande que la classe du ciment est basse (cette constatation n'est pas démontrée de nos jours).
- Si la fumée de silice est considérée comme un ajout, et dans la mesure d'un rapport E/C constant, il est facile de constater que la résistance à court terme est supérieure à celle d'un béton ne contenant pas de fumées de silice.

L'effet maximal des ultrafines peut en effet être atteint en pratique, mais cela exige une défloculation de tous les grains : on est alors en présence d'une action combinée des fumées de silice et des superplastifiants. [14]

Les ajouts minéraux influent différemment les uns des autres sur les propriétés du béton, les cendres volantes et les laitiers permettent un maintien d'ouvrabilité plus long, contrairement aux fillers calcaires qui favorisent la prise du matériau.

La fumée de silice, vu son important module de finesse, permet d'augmenter la compacité et donc la résistance mécanique.

### **I.5.3 L'eau**

L'eau utilisée en générale pour l'élaboration des bétons est l'eau du réseau public. Etant donné que le dosage en eau influe de manière considérable sur la viscosité et la capacité d'autocompaction du béton autoplaçant, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est donc très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

### **I.5.4 Les ajouts chimiques**

Les ajouts chimiques sont des adjuvants qui, incorporés au béton modifient une ou plusieurs de ses propriétés à l'état frais ou durci.

Etant constitués le plus souvent de produits tensio-actifs, il suffit donc de très faibles proportions du produit pour provoquer des modifications importantes des propriétés du béton, notamment si le dosage prescrit par le fabricant est respecté.

Pour certains types d'adjuvants, et pour un dosage moindre, le même adjuvant peut présenter une fonction secondaire. [10]

#### **I.5.4.1 Classification des adjuvants**

La classification des adjuvants repose essentiellement sur les propriétés qu'ils confèrent au béton. [10,15,16]

##### **a. Adjuvant plastifiant –réducteur d'eau**

A dosage en eau constant il permet d'augmenter l'affaissement au cône d'Abrams. Et à consistance égale, il permet de réduire le dosage en eau et ainsi d'augmenter la résistance mécanique du béton.

L'emploi de ce produit est très simple, il est ajouté à l'eau de gâchage à un certain dosage recommandée par le fabricant.

En dose exagérée ce type d'adjuvant peut retarder la prise et /ou entraîner de l'air ce qui diminue la résistance du béton.

##### **b. Adjuvant super plastifiant –haut réducteur d'eau**

Sa définition est identique à celle du plastifiant –réducteur d'eau mais la réduction du dosage en eau et l'augmentation de l'affaissement sont plus marquées.

L'augmentation de la résistance à la compression à 1 jour est supérieure à celle de 28 jours, ceci s'explique par un effet thermique accélérant les réactions d'hydratation du ciment.

##### **c. Adjuvant rétenteur d'eau**

A partir de sa mise en place jusqu'au début de sa prise le béton frais a tendance à se compacter progressivement, une partie de son eau interne remonte à la surface : c'est le phénomène de ressuage.

Cette perte d'eau peut entraîner des déformations indésirables et même des fissures et influencer la durabilité des bétons.

La fonction du rétenteur d'eau est de réduire cette perte d'eau.

#### **d. Adjuvant entraîneur d'air**

Les entraîneurs d'air sont des composés d'addition généralement résineux ou à base d'huile végétale ou minérale, ils se présentent sous forme de liquides, de sels solubles ou de poudres insolubles à ajouter lors du malaxage.

L'entraîneur d'air permet la formation, au moment du malaxage, d'un réseau uniforme de petites bulles d'air (dont 80% sont inférieures à 100 microns), qui subsiste dans le béton.

Les bulles d'air d'une part agissant comme autant de grains fins analogues à de petites billes souples et sans frottement, participent à l'amélioration de la plasticité et de l'ouvrabilité, d'autre part elles permettent au béton de tenir au gel et de mieux résister aux sels de déverglaçage.

#### **e. Adjuvants accélérateurs de prise**

Ils agissent sur le processus d'hydratation du ciment en augmentant sa vitesse, cela entraîne un déclenchement rapide du phénomène de prise accompagné d'un dégagement de chaleur plus important.

Les accélérateurs de prise servent à maintenir un temps de prise raisonnable par temps froid, mais réduisent aussi le temps de prise aux températures plus élevées, ce qui devient un inconvénient lorsque le temps est insuffisant pour permettre le transport et la mise en place du béton. C'est pour cela que la norme exige à la fois une diminution minimale du temps de prise à 5°C, et un temps de prise suffisamment long à 20°C.

#### **f. Adjuvants accélérateurs de durcissement**

Les accélérateurs de durcissement servent à avancer le développement de la résistance du béton à court terme, ce qui permet de réduire les délais d'exécution.

Ces adjuvants peuvent être utilisés aussi bien à 5°C qu'à 20°C, mais il existe une différence entre les performances mécaniques, ceci peut s'expliquer par le fait que le durcissement du béton après 48h à 5°C est moins avancé qu'il ne l'est à 24h à 20°C.

#### **g. Adjuvants retardateurs de prise**

Ils retardent l'hydratation et la prise du ciment dans le but de prolonger l'état plastique du béton. Dans ce cas c'est le retard du début de prise qui est recherché, mais il a pour conséquence de retarder le temps de fin de prise. Ce phénomène a pour inconvénient d'augmenter les délais d'exécution du chantier.

Contrairement aux accélérateurs les retardateurs diminuent la résistance initiale mais augmentent la résistance finale du béton.

#### **h. Adjuvants hydrophobants**

Ce sont des adjuvants qui améliorent l'étanchéité du béton durci et le protègent de l'humidité en réduisant l'absorption capillaire.

### I.5.4.2 Effets et performances des adjuvants

Le tableau I.1 résume les différents types d'adjuvants ainsi que leur performances par rapport un béton témoin. [10]

Tableau I.1 : Différents types d'adjuvants pour béton. [10]

Adjuvant	Effet(s)	Performances par rapport à un béton témoin
Plastifiant Réducteur d'eau	Réduction du dosage en eau	≥ 5%
	Augmentation de la résistance à la compression à 7 et 28 jours	≥ 110%
Superplastifiant Haut Réducteur d'eau	Réduction du dosage en eau	≥ 12%
	Augmentation de la résistance à la compression à 1 jour	≥ 140%
	Augmentation de la résistance à la compression à 28 jours	≥ 115%
	Augmentation de l'affaissement au cône d'Abrams	≥ 120mm
Rétenteur d'eau	Diminution de la quantité d'eau ressuée	≤ 50%
Entraîneur d'air	Augmentation de la quantité d'air entraîné	≥ 2,5%
Accélérateur de prise	Augmenter le temps de début de prise à 20°C	≥ 30min
	Diminution du temps de début de prise à 5°C	≤ 60%
Accélérateur de durcissement	Augmentation de la résistance à la compression à 24h à 20°C	≥ 120%
	Augmentation de la résistance à la compression à 48h à 5°C	≥ 130%
Retardateur de prise	Augmenter le temps de début de prise	≥ 90 min
	Diminuer le temps de fin de prise	≤ 360 min
Hydrophobant	Absorption capillaire pendant 7 jours après 7 jours de conservation	≤ 50%

### I.5.4.3 Mécanismes d'actions du superplastifiant et de l'agent de viscosité

Ce qui caractérise la composition du béton autoplaçant est la présence de deux adjuvants : le superplastifiant et l'agent de viscosité.

Ces deux adjuvants permettent d'ajuster les propriétés rhéologiques du béton dans deux sens opposés, le premier sert à fluidifier le béton tandis que le deuxième augmente sa viscosité pour assurer la stabilité.

Dans ce paragraphe nous présenterons les propriétés et le mécanisme d'action de chacun des deux adjuvants.

### I.5.4.3.a Le Superplastifiant

Un super plastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou un coulis, 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 [8].

Les principaux super plastifiants utilisés sont à base de :

- copolymère formaldéhyde naphthalène sulfonate (PNS).
- copolymère formaldéhyde mélamine sulfonate (PMS).
- polymère avec des fonctions acrylate (PA).
- polymère avec des fonctions carboxylate (PC).
- monomère avec des fonctions phosphonate et/ou carboxylate (MPC).

#### ❖ Mécanisme d'action d'un super plastifiant

Le super plastifiant interagit avec les particules du mortier (ciment et additions) en s'adsorbant à leurs surfaces (figure I.2) ce qui permet d'éviter le phénomène de floculation au contact avec l'eau.

Les particules sont alors dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stérique, l'eau piégée entre les particules est dégagée, la proportion d'eau libre est donc plus importante [10,17, 18].

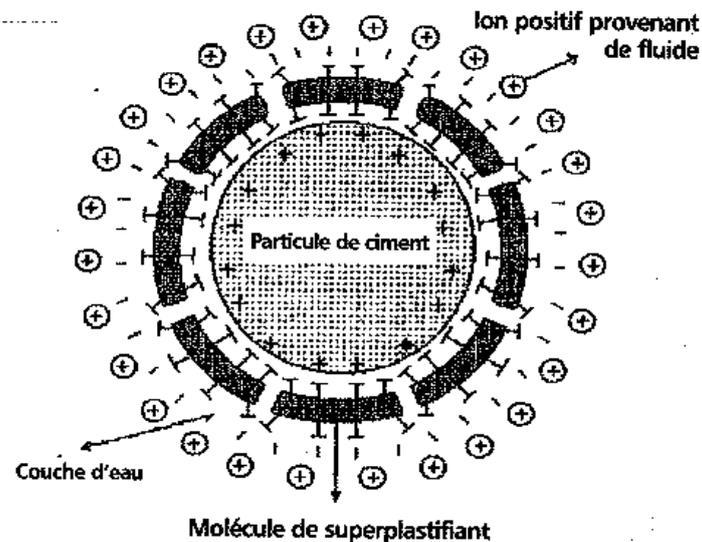


Figure I.2 : mécanisme d'action du superplastifiant. [1]

#### ❖ Effet électrostatique

Le comportement rhéologique des suspensions de ciments en présence d'eau peut s'expliquer par la présence de forces intergranulaires.

Il existe deux types de forces interparticulaires :

- Les forces de van der waals.
- Les forces de double couche électrique.

- **Les forces de Van der Waals** : Ceux sont des forces attractives, car il existe une traction entre les atomes de différentes particules, cette force diminue lorsque la distance entre les particules augmente.

- **Les forces de double couche électrique** : Ce sont des forces répulsives. Lorsque les particules sont en contact avec de l'eau elles deviennent porteuses des Charges électriques, ces charges sont dues aux réactions acides –base qui existent dans le mélange.

La couche d'eau qui entoure une particule est chargée du même signe. Donc entre deux particules de même nature il existe deux couches de même signe, d'où l'apparition de Forces répulsives entre les particules.

Dans le cas où les forces de van der Waals sont dominantes le système est floculé et possède de mauvaises propriétés d'écoulement.

Par contre si c'est les forces de double couche électrique qui sont dominantes le système est défloculé et a de bonnes propriétés d'écoulement.

Lors de l'ajout du super plastifiant :

Les molécules du superplastifiant agissent sur les particules du mélange en s'adsorbant à leur surfaces, et en réduisant les forces de van der Waals, une fois les forces de VDW diminuées les particules sont défloculées.

Dans le cas où les molécules sont ionisées dans le liquide, elles modifient l'état de charge des surfaces des particules et donc les forces de double couche électrique. Par exemple si les particules sont faiblement chargées les molécules ionisées vont augmenter la charge et créer des forces répulsives plus grandes.

Et si les particules sont moyennement chargées les additions de faibles quantités vont neutraliser quelques charges et donc diminuer les forces de répulsions, on aura alors un effet épaississant.

### **Effet stérique ou entropique**

Cet effet dépend du volume occupé par la molécule polymère

Dans ce cas une partie des molécules du SP se fixe à la surface des particules et l'autre partie reste libre dans le liquide en raison de son affinité avec ce dernier.

Lorsque deux particules chevelues se rapprochent au point que les chaînes puissent s'interpénétrer, il y a une augmentation de l'énergie du système associée à une force de répulsion entre les deux particules.

Pour une composition granulaire donnée la capacité de remplissage d'un BAP dépend fortement du dosage en super plastifiant. Elle croît avec le dosage en superplastifiant jusqu'à atteindre un maximum au-delà duquel apparaissent les phénomènes de ségrégation des constituants.

**Remarque** : la quantité de polymère adsorbée par le ciment dépend du caractère ionique plus ou moins prononcé de l'adjuvant et de son poids moléculaire. L'adsorption est d'autant plus forte que le polymère est fortement ionique et le poids moléculaire faible. BURGE (1999) montre que les polymères peu ioniques permettent d'obtenir une meilleure fluidification des bétons autoplaçant [8].

### **I.5.4.3.b L'agent de viscosité**

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais a tendance à réduire sa viscosité, le matériau devient alors moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage [8].

Pour minimiser cet effet l'ajout d'un agent de viscosité s'avère nécessaire.

Les agents de viscosité sont de natures :

- dérivées cellulosiques à base de méthyl cellulose, d'hydroxy-éthyl cellulose.
- Polymères qui sont des Polysaccharides obtenus par fermentation microbiologique (par exemple : gomme Welan, gomme de xanthane).
- colloïde naturel.
- suspension de particules siliceuses.

Ils se présentent, généralement, sous forme de poudre à mélanger soit aux matériaux secs, soit avec une partie de l'eau de gâchage.

L'agent de viscosité est composé de longues chaînes de polymères qui se fixent sur les molécules d'eau et par enchevêtrement, augmentent la viscosité de la pâte. Ses caractéristiques rhéologiques sont améliorées, (cohésion, homogénéité), ainsi une meilleure adhérence est observée, ceci permet de maintenir une distance entre les granulats et de conserver une répartition homogène des différents constituants, et de réduire les interactions de friction et de collision lors de l'écoulement du béton. Le risque d'apparition du phénomène de blocage au droit d'un obstacle est alors minimisé.

Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'augmenter la quantité du liant pour assurer un écoulement sans ségrégation.

L'utilisation de cet adjuvant n'influe pas sur les propriétés du béton à l'état durci, excepté dans le cas d'une variation de la teneur en air. Un dosage trop élevé de l'agent colloïdal entraîne une perte de fluidité, aussi il conduit à un entraînement d'air excessif.

Les différents types d'agent de viscosité ont un comportement différent, ceux à base de polysaccharide, en particulier la gomme de welan semblent se différencier par la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse, présentent un seuil de cisaillement élevé et une faible viscosité pour des contraintes de cisaillement élevées. Le béton possède donc une forte déformabilité lorsqu'il s'écoule et celle-ci devient plus faible lorsque le mouvement du matériau s'arrête. Ceci permet d'améliorer la résistance à la ségrégation dynamique et statique.

Des études ont montrées que le rôle le plus important de l'agent de viscosité est de faciliter la fabrication du BAP en la rendant moins pointus. En effet, l'emploi d'un agent de viscosité stabilise le béton, et diminue nettement sa sensibilité aux variations de teneurs en eau et au module de finesse du sable

### **I.5.4.3.c Le couple superplastifiant - agent de viscosité**

Pour optimiser les propriétés rhéologiques du béton autoplaçants, fluidité et stabilité, il est nécessaire de choisir un couple compatible de superplastifiant et d'agent de viscosité, à des dosages bien précis déterminés expérimentalement.

Les deux adjuvants agissent dans deux sens opposés, mais pour maintenir l'étalement de la pâte, des études ont montrées que la dose du superplastifiant croit avec le dosage en agent de viscosité.

Par ailleurs, il existe des cas d'incompatibilités entre certains agents colloïdaux et des superplastifiants, c'est le cas pour les agents de viscosité à base de méthyle cellulose et les fluidifiant à base de naphthalène.[9]

#### **I.5.4.3.d La compatibilité ciment superplastifiant**

L'interaction ciment adjuvant est encore difficile à prévoir et force de considérer chaque couple ciment adjuvant comme un cas particulier. Les paramètres influents sur cette relation sont : la température, le mode d'introduction de l'adjuvant, le dosage en adjuvant.

Une faible variation sur le dosage de certains adjuvants peut engendrer d'importante modification sur le temps de prise du ciment.

Le mode d'ajout du superplastifiant peut aussi être déterminant, pour des ciment a faible teneur en sulfates il est préférable d'introduire l'adjuvant en deux fois : un tiers avec l'eau de gâchage, et les deux tiers en fin de malaxage.

Le ciment réagit dès qu'il est en contact avec l'eau, le processus d'hydratation permet la formation de deux composantes :

L'ettringite (liée à l'hydratation du  $C_3A$ ) et les ponts C-S-H (liés à l'hydratation du  $C_3S$ ). En leur présence, Les superplastifiant au delà de leur effet physique modifiant les forces interparticulaires, peuvent intervenir dans le processus chimique de l'hydratation, réagir avec le  $C_3A$  (aluminate tricalcique) ce qui peut bloquer la formation d'ettringite, et même empêcher ou retarder la mise en solution des sulfates de calcium présents dans le ciment. On parle alors d'incompatibilité ciment – superplastifiant. [19]

#### **I.6 Relation entre les différentes propriétés d'un BAP**

Une fluidité élevée et une résistance suffisante à la ségrégation sont deux exigences essentielles pour qu'un béton puisse être considéré comme autoplaçant.

Le béton autoplaçant doit être capable de se déformer pour remplir les coffrages densément armés sans intervention extérieure, ceci doit se faire sans qu'il y ait un risque de séparation des différents constituants, cette caractéristique est appelée : capacité de remplissage.

La capacité de remplissage dépend de deux facteurs : la déformabilité et la stabilité.

En 1991, Ozawa et al ont présenté la relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton, (Figure I.3), lorsque l'affaissement est faible, les frictions entre les particules augmentent ainsi l'écoulement est arrêté. [9]

Par contre lorsque l'affaissement est élevé, les granulats cisailent le mortier et se rapprochent les uns des autres, on assiste à la formation de voûtes (signe de ségrégation) qui empêchent l'écoulement du béton.

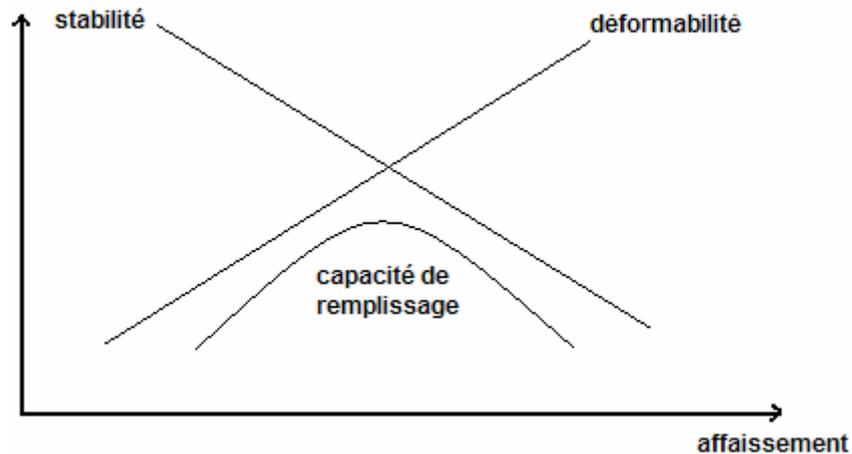
En conséquence, pour garantir une bonne capacité de remplissage il est nécessaire d'augmenter la déformabilité du béton et de diminuer le risque de ségrégation (assurer une bonne stabilité).

La stabilité du béton dépend particulièrement de deux facteurs : la viscosité du mortier et le volume des gros granulats.

Effectivement, lorsque la viscosité diminue, les granulats se déplacent plus facilement dans le mortier grâce aux forces de viscosité. Donc pour minimiser la ségrégation il faut augmenter la viscosité du mortier.

D'après Ozawa (1992), les forces de frottements entre les granulats varient proportionnellement au volume et à la taille des granulats. Plus les granulats sont gros, plus les forces de frictions sont importantes, ce qui augmente le risque de blocage lors de l'écoulement.

La déformabilité, elle, ne dépend que de la quantité d'eau libre présente dans le mélange.[20]



**Figure I.3:** variation de la capacité de remplissage en fonction de l'affaissement (Ozawa et al 1991).

**Chapitre II :**  
**Formulation d'un béton autoplaçant.**

## **Chapitre II : Formulation d'un béton autoplaçant.**

### **Introduction**

Depuis son apparition, le béton autoplaçant a fait l'objet de plusieurs recherches. Des chercheurs du monde entier se sont penchés sur le problème de formulation des BAP, et plusieurs méthodes ont été développées.

Nous nous proposons, dans un premier temps, de présenter quelques approches de formulation du béton autoplaçant avec les résultats des essais, issus de la littérature, effectués sur ces formulations. Dans un deuxième temps, nous présenterons l'analyse de quelques approches suivie d'une conclusion.

### **II.1 Principes de formulation**

Les deux principales propriétés recherchées des BAP sont une grande fluidité et une grande résistance à la ségrégation. Ces deux propriétés sont à priori contradictoires pour un béton ordinaire, l'obtention de l'une se fait au détriment de l'autre.

La formulation d'un BAP requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, et l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

Les caractéristiques des BAP doivent assurer :

- La mobilité des matériaux en milieu non confiné (déterminée par l'essai d'étalement).
- la stabilité, qui veut dire une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage (déterminée par l'essai de la stabilité au tamis).

L'étape de formulation consiste à choisir une proportion optimal et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques rhéologiques du béton.

Le facteur le plus important dans la formulation d'un BAP est l'eau, en effet le principe de ce type de béton est de diminuer la quantité d'eau utilisée tout en assurant une bonne maniabilité à l'état frais. La diminution de la teneur en eau conduit à de bonnes caractéristiques mécaniques tel que : une résistance plus élevée, fluage et retrait plus faibles, et une durabilité accrue.

Beaucoup de recherches ont été faites sur l'optimisation et le développement de formulations de béton autoplaçants, l'objectif principal de ces recherches ont pour objectif l'amélioration des performances du béton à l'état frais et durci.[21]

## II.2 Différentes approches pour la formulation des BAP

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.

On citera donc quelques formulations rapportées de la littérature ainsi que des exemples de formulations réalisées. [2]

### II.2.1 Formulation par la méthode japonaise par okamura

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

- Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé si le volume des gravions (dans  $1\text{m}^3$ ) 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. La compacité des gravions est en générale égale à 0,57.

Par exemple dans le cas d'un béton 0/10 le volume des gravions est de  $285\text{ l/m}^3$ , et dans le cas d'un béton 0 /14 ce volume est reparti pour moitié en 6 /10 et l'autre moitié en 10/14.

- le volume du sable est posé à 40% du volume du mortier, lorsque les frictions granulaires sont réduites la fluidité du béton est assurée.

- les dosages en liant est en superplastifiant ne sont pas précisés par cette méthodes ils sont choisis sur des critères de résistance.

- les dosages d'eau et du superplastifiant sont déterminés en effectuant des essais sur un mortier dosé à 40% en sable. [2,9]

#### ❖ Essais sur mortier

Les essais réalisées sur mortier sont : l'essai d'étalement au cône à mortier, et l'essai d'écoulement à l'entonnoir.

Deux grandeurs sont alors calculées : L'étalement normalisé D, et le temps d'écoulement relatif T.

$$D = (d^2 - d_0^2 / d_0^2) \quad \text{et} \quad T = (10/t)$$

Sachant que :

d : diamètre d'étalement ;

$d_0$  : diamètre inférieur du cône ;

t : temps d'écoulement en secondes ;

D : représente la fluidité, plus D est grand plus le mortier est fluide ;

T : représente la viscosité, plus T est faible, plus la viscosité est élevée.

Les chercheurs Japonais ont montré qu'il existe une relation entre l'étalement et l'écoulement, cette relation est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiant constante. Il est alors possible de déterminer un couple adjuvant /eau optimal permettant de fluidifier le mortier.

Pour un béton autoplaçant acceptable les chercheurs ont fixés  $D=5$  et  $T=1$ .

### ❖ Risque de blocage

Les chercheurs japonais ont proposés une approche de l'évaluation du risque de blocage du béton en utilisant l'essai de la boîte en L, et ont fait l'hypothèse que le phénomène était indépendant de la nature de la pâte, si elle est suffisamment fluide. L'expression du risque de blocage  $R_b$  s'écrit :

$$R_b = (1 - V_p) \sum (Y_i / V_{cr,i})$$

Avec:

$V_p$  : proportion volumique de la pâte dans le béton.

$Y_i$  : proportion volumique de grains de tailles  $d_i$  rapportée au volume de granulats

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

En écrivant  $R_b = 1$ , pour chaque rapport gravions / sable, on peut déduire la teneur en pâte minimale pour éviter le blocage. (le risque de blocage a lieu si  $R_b \leq 1$ ).

### II.2.2 L'approche suédoise : par [Petersson et al 1996]

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise citée ci-dessus, le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation.

Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G/S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées. Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée.

Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats [20].

### II.2.3 L'approche de la JSCE

Cette méthode a été proposée par la *japanese society of civil engineers* en 1998, après plusieurs recherches et applications pratiques.

Pour cette méthode la quantité d'eau, le rapport eau/poudre, et la teneur en poudre, varient en fonction de l'emploi ou non d'un agent de viscosité [22].

Les quantités de différents constituants sont déterminées comme suit :

### ❖ Quantité de gros granulats

Cette quantité varie selon l'autocompactibilité recherchée. Elle est située entre 0,30 à 0,32  $m^3/m^3$  et le diamètre maximum est limité à 20 mm voir 25 mm.

### ❖ Quantité d'eau

Lors de l'utilisation d'un agent de viscosité, la quantité d'eau se situe sous les 180 kg/ m<sup>3</sup> dans les conditions d'exposition normales. Cas particulier, lorsque la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, on peut aller jusqu'à 190 kg/ m<sup>3</sup>.

En l'absence d'agent de viscosité, la quantité d'eau est réduite à 155 jusqu'à 175 kg/ m<sup>3</sup>.

### ❖ Rapport eau/poudre

Ce rapport est basé sur les performances du béton à l'état durci. Lorsque la fluidité n'est pas atteinte on peut augmenter la quantité du liant.

Le rapport massique eau / poudre doit être entre 28 et 37%, et le rapport volumique entre 85 et 115 %.

### ❖ Quantité de poudre et de liant

La quantité de poudre se déduit du rapport eau /poudre. Dans le cas d'un agent de viscosité de type polysaccharide, la quantité de poudre est de 0,13 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> .dans les autres cas la valeur prise doit être entre 0,16 et 0,19 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

### ❖ Quantité d'air

Cette valeur dépend du diamètre maximum des gros granulats, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton.

La valeur type s'élève à 4,5% d'air.

### ❖ Quantité de fins agrégats

Cette quantité est déduite des quantités précédentes.

### ❖ Dosage en adjuvants

Le dosage en adjuvant est évalué expérimentalement. Pour le superplastifiant, son dosage dépend du rapport eau/poudre ainsi que de la nature des poudres. Il est généralement de 1 à 2 kg d'extrait sec par m<sup>3</sup>, pour une solution aqueuse de 35% c'est l'équivalent de 3 à 6 litres.

En ce qui concerne l'agent de viscosité, son dosage varie selon la nature de l'agent, aussi selon le type de béton (avec ou sans ajouts de fines) :

De 0,15 à 0,30% de la quantité d'eau pour les agents cellulosiques,

3 à 5% pour les acryliques,

2 à 3% pour les glycols,

0,05 % pour les polysaccharides solubles.

### **II.2.4 Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC : Par [De Larrard et al 1994]**

Cette approche consiste à développer un modèle mathématique à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre différents constituants du mélange [9].

Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire et de prendre en compte l'effet de confinement des armatures sur la compacité du béton et donc sur son ouvrabilité.

La compacité du mélange est déterminée avec une précision inférieure à 1% à partir des caractéristiques des constituants suivants :

- Les distributions granulaires
- Les proportions du mélange
- La compacité propre
- La densité apparente

Ce modèle est utilisé pour prévoir l'évolution de l'ouvrabilité des bétons en fonction de leur composition, il sert aussi à :

- Comprendre et évaluer l'influence des différents constituants sur les propriétés du béton.
- Choisir les matériaux qui permettent d'assurer un béton de bonnes caractéristiques que ce soit à l'état frais (ouvrabilité, stabilité) ou à l'état durci (résistance, retrait, fluage)
- prendre en compte la spécificité et la nature d'un projet lors de la formulation de béton (béton pompé par exemple).

#### **Exigences du cahier des charges**

La formulation d'un béton se fait à partir d'un cahier de charges, dans ce cas les critères exigés sont les suivants :

- Etalement : 600 à 700 cm
- Viscosité plastique : supérieure à 100Pa.s pour éviter la ségrégation
- Et inférieure à 200Pa.s pour un coulage rapide
- Il faut aussi connaître :
- La résistance à la compression souhaitée à 28jours

L'environnement de bétonnage qui traduit un confinement potentiel, il faut tenir compte de l'effet de paroi (espacement des armatures)

Après le choix des matériaux il est nécessaire de déterminer les caractéristiques suivantes :

La compatibilité ciment –super plastifiant

La compatibilité super plastifiant –agent de viscosité

La nature des additions minérales (fumées de silices, laitiers, fillers calcaire)

#### **Détermination des proportions des constituants**

- fixer la proportion de liant a priori
- détermination du dosage en saturation su super plastifiant

- détermination du besoin en eau du mélange en présence du SP, cette valeur donne une mesure indirecte de la compacité, valeur nécessaire pour vérifier le modèle de suspension de solide
- le calcul est effectué avec un logiciel en tenant en compte du confinement.
- la viscosité est fixée arbitrairement à  $5 \cdot 10^4$  Pa.s (valeur correspondant au BAP selon les expériences du LCPC)
- la teneur en eau est réduite en conséquence et la teneur en fillers est maintenue constante.
- le rapport G / pâte liante est optimisé
- le béton est élaboré en petites quantités 10 à 15 l et sa teneur en eau est ajustée pour améliorer la résistance.
- Le dosage en SP est aussi ajusté pour obtenir l'étalement souhaité, ceci n'affecte pas la viscosité plastique.

A ce stade le béton vérifie les propriétés rhéologiques imposées par le cahier des charge a savoir la contrainte de cisaillement et la viscosité plastique.

- l'évolution du comportement rhéologique doit être étudiée, l'addition d'un ajout chimique peut s'avérer nécessaire.

Pour vérifier la validité d'une formulation celle-ci doit être confrontée à des expérimentations en vraie grandeur pour appréhender les problèmes de ségrégation.

## II.2.5 Formulation par volume de pâte minimal

Dans cette méthode le béton est considéré comme un matériau biphasique, une phase solide constitué par les granulats et une phase liquide qui est la pâte (eau, liant, adjuvants). [2]

Les chercheurs supposent que la pâte joue deux rôles principaux dans un BAP : D'une part, elle assure la fluidité du mélange, ce qui limite les frottements entre les granulats, d'autre part elle écarte les gravions pour éviter le phénomène de blocage. Pour assurer ces deux rôles les chercheurs jugent qu'il doit exister un volume minimum de pâte, ils proposent alors les deux critères suivants :

### a. Critère de fluidité

Le volume de pâte nécessaire pour fluidifier  $1\text{m}^3$  de béton peut être déterminé en fonction de la porosité du mélange, et de la granulométrie des granulats utilisés.

La formule s'écrit :

$$V_{\min} = 1 - (1 - V_{\text{vide}})/C_e$$

**Avec :**

$V_{\text{vide}}$  : la porosité ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) mélange de sable + gravillon, mesurée selon la norme américaine.

$C_e$  : coefficient d'écartement.

Le coefficient  $C_e$  est calculé comme suit :

$$C_e = ((e_{\min} / D_{\text{moy}}) + 1)^3.$$

**Avec :**

$D_{\text{moy}} = \sum (m_i \times d_i) / \sum m_i$  , le diamètre moyen des granulats et :

$d_i$  : le diamètre du tamis  $i$  (mm) ;

$m_i$  : masse de granulats sur le tamis  $i$  (kg) ;

$e_{\min}$  : est la distance moyenne entre les granulats pour fluidifier le béton (mm).

Lorsque  $C_e$  est égal à 1,  $V_{\min}$  est égale à  $V$  vide, le volume de pâte remplit la porosité des granulats, dans le cas où  $C_e > 1$ , non seulement le volume de pâte comble la porosité mais il sert aussi à écarter les granulats.

La détermination de la valeur de  $e_{\min}$  se fait de façon expérimentale, il s'agit de confectionner des béton en faisant varier le volume de la pâte (en le diminuant), et de mesurer l'étalement du béton.

Lorsque l'étalement est inférieur à 65cm, le volume de pâte correspondant est considéré comme étant le volume minimal de pâte à prendre.

En faisant varier le rapport (eau/fines), et pour différents paramètres maximaux du gravillon, on obtient des courbes donnant  $e_{\min}$  en fonction  $D_{moy}$ .

Les chercheurs ont choisi de faire varier que trois paramètres : le rapport eau/fines, diamètre maximal du gravillon,  $D_{moy}$ . Ce choix est justifié par souci de simplifier le modèle.

### b. Critère de non blocage

Il s'agit dans cette partie de modéliser  $V_{bi}$  qui est le volume limite de granulats de taille  $d_i$ , au-delà duquel le béton ne s'écoule plus dans un milieu confiné.

La modélisation de  $V_{bi}$  est faite en fonction du rapport de l'espacement  $e$  des armatures et du diamètre  $d_i$ .

La figure suivante représente la variation du volume limite de blocage d'un sable en fonction du rapport  $e/d_i$ .

On remarque que le volume critique d'un sable quelconque ( $e/d_i > 15$ ) est de  $840 \text{ l/m}^3$  prépondérant, si le béton est fluide.

L'ordonnée du point A est déterminée expérimentalement pour les gravillons utilisés dans le béton à formuler, donc pour tracer la courbe du volume critique, plusieurs essais doivent être effectués.

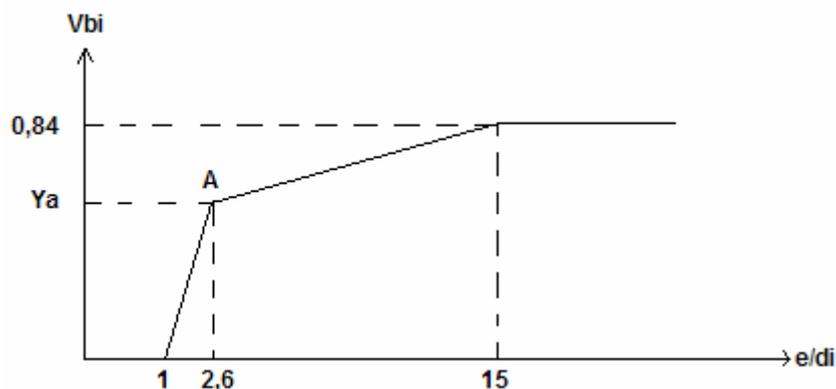


Figure II.1 : variation de  $V_{bi}$  en fonction de  $e/d_i$ .

Pour simplifier la méthode, on utilise les formules adoptées par les chercheurs, où le risque de blocage s'écrit en fonction du rapport du volume  $V_i$  de granulats  $d_i$  et de son volume limite  $V_{bi}$  :

$$R = \sum (V_i / V_{bi})$$

De cette expression est déduit le volume de pâte pour  $1\text{m}^3$  en posant  $R = 1$ .

L'expression de  $V_{bmin}$  s'écrit en fonction des paramètres suivants :

- $\rho_s$  : masse volumique du sable ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;
- $\rho_g$  : masse volumique du gravillon ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;
- $N_g$  : rapport entre la masse du gravillon et la masse totale de granulats ;
- $P_{gi}$  : proportion de gravillon de diamètre  $i$  (%) ;
- $P_{si}$  : proportion de sable de diamètre  $i$  (%).

Pour différents rapports G/S croissant, on remarque que contrairement au critère de fluidité qui donne un volume de pâte décroissant, le critère de non blocage donne une fonction décroissante du volume de la pâte.

Le choix du rapport G/S peut se faire de manière arbitraire, en posant  $G/S = 1$ , ou alors par mesure d'économie on peut diminuer ce rapport au maximum pour limiter la quantité du liant.

Il faut noter aussi qu'un fort dosage en sable entraîne plus d'air.

Le mélange sable est gravillon est choisi de façon à avoir une porosité minimale, cette optimisation se fait avec le logiciel : René –LCPC.

Pour le rapport E/C, il est normalement imposé par le critère de fluidité, sinon il est fixé et l'étalement du béton est ajusté par le dosage du superplastifiant.

## II.2.6 Formulation par optimisation du squelette granulaire

Sachant que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte et que l'ouvrabilité est tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. La formulation des bétons est basée sur l'optimisation de la porosité du système, en prenant en considération tous les grains solides, du ciment aux gravillons.

Si la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on optimise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

Les chercheurs Sedran et de Larrard ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage.

En effet, de nombreuses études consacrées aux suspensions de grains solides montrent qu'il existe une relation directe entre la viscosité du mélange et le rapport entre concentration solide  $\Phi$  et la compacité de l'assemblage sec des grains.

A l'aide de ces variables Les chercheurs du LCPC ont essayé de modéliser le comportement rhéologique du béton (viscosité et seuil de cisaillement), en proposant un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

Le modèle de calcul proposé (modèle d'empilement compressible) fait intervenir les deux notions suivantes : la compacité virtuelle et l'indice de serrage. [2,3]

### ❖ La compacité virtuelle $\gamma$

Elle correspond à la compacité maximale que pourrait atteindre l'empilement des grains, si tous les grains étaient rangés de manière optimale.

Elle est fonction de :

$Y_i$  : proportion volumique des différents grains

$\beta_i$  : compacité virtuelle des grains

$Y_i, \beta_i$  : sont des coefficients déterminés servant à modéliser les effets de desserrement et de parois d'une classe sur une autre.

### ❖ L'indice de serrage

En réalité un empilement ne peut pas atteindre sa compacité virtuelle, l'indice de serrage est représentatif du degré de compaction, il est défini comme étant la somme des indices de serrage  $k'_i$  de chaque classe granulaire  $d_i$ .

Pour un indice de serrage infini la compacité réelle du mélange de grains est égale à la compacité virtuelle  $\gamma$ ,  $\gamma$  est la borne inférieure des  $\gamma_i$ .

Pour un béton, la porosité du squelette granulaire  $(1 - \Phi)$  est égale aux volumes d'eau et d'air pour  $1\text{m}^3$ . L'indice de serrage représente alors l'énergie qu'il faut fournir au béton pour atteindre la compacité  $\Phi$ .

Les chercheurs du LCPC ont développé un rhéomètre à béton qui a servi à montrer que le comportement rhéologique des bétons peut être approché par le modèle Binghamien. La contrainte de cisaillement est alors une fonction linéaire de la vitesse de déformation :

$$\tau = \tau_0 + \gamma \mu$$

Avec :  $\tau_0$  et  $\mu$  respectivement le seuil de cisaillement et la viscosité du béton.

Il a été montré que le comportement à l'état frais du béton dépend de l'arrangement de son squelette granulaire et que la viscosité n'est pas fonction du dosage en superplastifiant.

La pratique montre que pour diminuer la viscosité du béton il faut augmenter la quantité d'eau (diminuer la concentration solide) ou doser le squelette granulaire de telle sorte qu'il soit le plus compact possible à l'état sec.

Une modélisation du seuil de cisaillement a été adoptée à l'aide des indices de serrage  $K'_i$  des différentes classes granulaires.

$K'_c, K'_f, K'_s, K'_S, K'_g, K'_G$  sont respectivement les indices de serrage du ciment, du filler, des éléments inférieurs à  $80 \mu\text{m}$  du sable, des éléments supérieurs à  $80 \mu\text{m}$  du sable, du petit gravillon, du gros gravillon.

$$\tau_0 = \exp (a_0 + a_c K'_c + a_f K'_f + a_s K'_s + a_S K'_S + a_g K'_g + a_G K'_G )$$

L'indice de serrage  $K_i$  représente la contribution de la classe  $i$  au seuil de cisaillement global. En effet, plus l'indice de serrage  $K_i$  est élevé, plus les grains de diamètre  $d_i$  sont proches les uns des autres, donc les frottements entre ces grains sont grands.

Dans l'expression précédente, les indices de serrage partiels sont affectés d'un coefficient  $a_i$  qui est fonction décroissante du diamètre moyen des grains. Ces coefficients sont calculés en fonction du dosage en superplastifiant et de son dosage en saturation.

C'est ce qui justifie l'augmentation des frictions entre grains lorsque le diamètre moyen diminue à volume de solide constant.

Les essais ont montré que la stabilité du béton et sa capacité à s'écouler dans un milieu confiné peuvent être estimées en limitant les valeurs des coefficients de serrages des éléments fins et des gros gravillons.

Ces modèles rhéologiques sont compilés dans un logiciel de formulation des bétons (bétonlab pro2). A partir des caractéristiques des matériaux, le logiciel simule la plupart des propriétés du béton formulé. Ce logiciel pourvu d'un module d'optimisation, peut aussi calculer une formule de béton à partir d'un cahier des charges précis, suivant un critère donné.

Le tableau II.1 propose le cahier des charges minimal à rentrer pour un BAP :

**Tableau II.1 : Cahier des charges d'un BAP.**

propriétés	Cahier des charges	BAP 0/10	BAP 0/14
$\tau_0$	$\leq 500$	371	305
$\mu$	$\leq 300$	339	350
$K'_P$	$\geq 3,4$	3,4	3,4
$K'_G$	$\leq 1,4$	1,3	1,2

### II.2.7 Méthode 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 ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines  $E/(C+A)$ , la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité.

Chaque facteur est varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions effectuées à 25. Au final, les modèles obtenus sont fournis avec les résultats des essais, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Même si ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC.

## II.3 Exemples de formulations

Le tableau II.2 présente différentes compositions obtenues avec différentes approches.[8]

**Tableau II.2** : Exemples de formulations de BAP.

Constituants (kg/m <sup>3</sup> )	App. japonaise	Min.pâte	Bétonlab pro	App. japonaise	Min.pâte	Bétonlab pro
G 10/14	0	0	0	436	721	544
G 6/10	873	917	808	436	211	279
Sable	704	813	810	704	827	806
Ciment	400	350	350	400	350	350
filler	330	210	275	330	220	280
eau	170	170	170	170	170	180
adjuvant	7.4	5.7	6.1	7.4	5.7	5.8
Vpâte (litre)	424	364	388	424	368	400
G/S	1.24	1.13	1	1.24	1.13	1.02
V <sub>G</sub> /V <sub>S</sub>	1.08	0.97	0.86	1.08	0.97	0.85
E/L	0.23	0.31	0.28	0.23	0.26	0.28
<b>Résultats des essais</b>						
étalement	75	72	68	74	68	70
H1/H2	0.82	0.3	0.8	0.85	0.4	0.8
laitance	13.8	12	2	15	2.6	3.9

## II.4 Analyse de quelques approches

### II.4.1 Analyse de l'approche japonaise

Cette méthode présente un inconvénient du point de vue économique, car le prix de revient de telles formulations est supérieur de 10 à 20 % par rapport à celui des BAP utilisés actuellement en France. [3]

Cependant, du point de vue calcul de la proportion des granulats, cette méthode est proche des méthodes utilisées actuellement. La masse de gravillon est fixée en prenant un volume égal à la moitié de la compacité.

La compacité des gravillons est déterminée par piquage des gravillons secs dans un cylindre.

De plus cette méthode permet de déterminer le dosage en eau et en superplastifiant par des essais sur mortier.

La méthode japonaise donne un béton visqueux vu la quantité de pâte importante calculée pour cette méthode.

### **II.4.2 Analyse de la méthode du volume minimal de la pâte**

Les essais de caractérisation effectués sur les compositions calculés par cette méthode n'ont pas été validés. Les lois utilisées pour cette formulation sont issues de la littérature et concernent certains granulats, il faudrait donc déterminer des différents coefficients des gravillons utilisés pour la formulation.

Cette méthode est basée sur la détermination de la quantité de pâte optimale a abouti a des résultats de fluidité satisfaisant  $> 65\text{cm}$ , ces essais ont permis de montrer la corrélation entre le volume de pâte et le résultat d'étalement.[2]

### **II.4.3 Analyse de l'approche par optimisation du squelette granulaire**

Les résultats donnés par le logiciel Bétonlab2 sont satisfaisants par rapport aux deux méthodes précédentes, mais rien ne garantie que ceux sont les formulations optimales .la masse des fines trouvées par le calcul est assez importante (plus de  $620\text{ kg/m}^3$ ).

La précision des calculs effectués dépend de la justesse des mesures des propriétés des constituants. Même si la mesure de la compacité est reconnue comme fiable, la détermination du dosage optimal du super plastifiant n'est pas assurée.

Cette méthode a permis de prouver la bonne concordance entre le seuil de cisaillement et l'étalement, aussi entre l'indice de non blocage et l'essai de la boite en L. Cependant aucune corrélation n'a été prouvée entre l'indice de ségrégation et le pourcentage de laitance récoltée lors des essais de la stabilité au tamis.

Par exemple pour l'approche japonaise l'indice de ségrégation est grand, donc elle devrait être la plus stable, mais il s'avère qu'elle présente le plus grand pourcentage de laitance, ce qui est contradictoire. On peut néanmoins s'interroger sur la pertinence de l'essai de stabilité pour des formulations contenant plus de 400l de pâte. [2]

## **II.5 Conclusion**

Après avoir présenter différentes méthodes de formulation et d'après les résultats d'essais effectués issus de la littérature ont permis de dresser les conclusions suivantes :

- la première étape dans une formulation est la caractérisation des matériaux utilisés, et leur interaction.
- Sachant que d'une part la compacité d'un gravillon est fonction de sa forme : un gravillon anguleux ou plat a une compacité plus faible qu'un gravillon arrondi, et d'autre part que la fluidité et le risque de blocage du béton dépendent de la forme des gravillons, il est donc judicieux de doser le gravillon à partir de sa compacité.
- la méthode japonaise a montrée qu'il existe une corrélation entre le comportement des BAP à l'état frais et son mortier. Il est donc préférable d'effectuer des essais sur mortiers dans un laboratoire que des essais sur béton, en centrale à béton.
- La méthode de formulation basée sur la minimisation de la pâte permet d'obtenir un BAP répondant aux exigences de l'AFGC.

- Pour répondre aux exigences de fluidité, caractérisées par la boîte en L, on peut jouer sur la quantité de pâte du béton. Sachant qu'une augmentation de la quantité de la pâte implique un accroissement de la fluidité

- la méthode d'optimisation du squelette granulaire a permis de montrer, que les granulats anguleux et denses nécessitent un volume plus grand de la pâte pour assurer la stabilité, leur écoulement et éviter le phénomène de blocage.

- L'utilisation du logiciel Bétonlab basé sur la caractérisation des constituants plus la formulation est certainement l'approche la plus cartésienne de la formulation des BAP (et des bétons en général).

C'est un outil pédagogique intéressant, puisqu'il permet d'appréhender l'influence de chaque constituant sur le comportement du béton, au moyen de simples simulations.

Néanmoins, si une bonne corrélation a été trouvée entre l'étalement et le seuil de cisaillement calculé, cela n'a pas été le cas entre l'indice de ségrégation et les résultats des essais au tamis.

La valeur limite de stabilité proposée est, d'après des essais, sévère. [2,3]

**Chapitre III :**  
**Caractérisation d'un béton autoplaçant**

## Chapitre III : Caractérisation d'un béton autoplaçant

### Introduction

Lorsqu'on s'intéresse aux BAP on se trouve souvent confronté au problème de caractérisation de ces bétons. La caractérisation d'un BAP à l'état frais consiste à décrire, à l'aide d'un matériel adéquat, le comportement visqueux de ce matériau. Cette étape permet d'aborder la formulation d'une manière plus fondamentale et de développer une méthodologie de formulation.

A cet effet, des chercheurs ont développés différents types d'essais, sur mortier et sur béton, on citera quelques uns :

#### III.1 Essais sur mortier frais

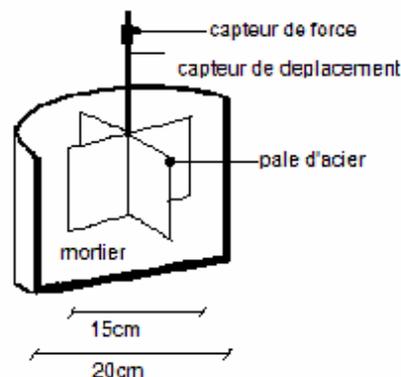
La capacité du béton à rester homogène dépend fortement de la nature du mortier qui le compose. Le mortier sert à séparer les granulats les uns des autres et à diminuer les forces de cisaillements dues à leurs déplacements.[2]

Pour qualifier l'aptitude d'un mortier à résister au cisaillement d'un gravillon, des chercheurs ont développé un montage constitué de :

- Un récipient pour contenir le mortier
- Une palette métallique qui représente les gravillons.
- Un capteur de force et un capteur de déplacement.

Le principe de l'essai consiste à extraire la palette métallique d'un échantillon de mortier à différentes vitesses et mesurer l'effort correspondant.

La variation de la force d'extraction en fonction de la vitesse d'extraction est représentée par les figure III.1 et III.2 Le but de cet essai est de formuler séparément le mortier d'un béton, en supposant que la ségrégation, lors de l'écoulement, est contrôlée par la viscosité apparente du mortier. Cette approche reste insuffisante.



**Figure III.1** : Montage pour mesurer de la résistance au cisaillement d'un mortier.

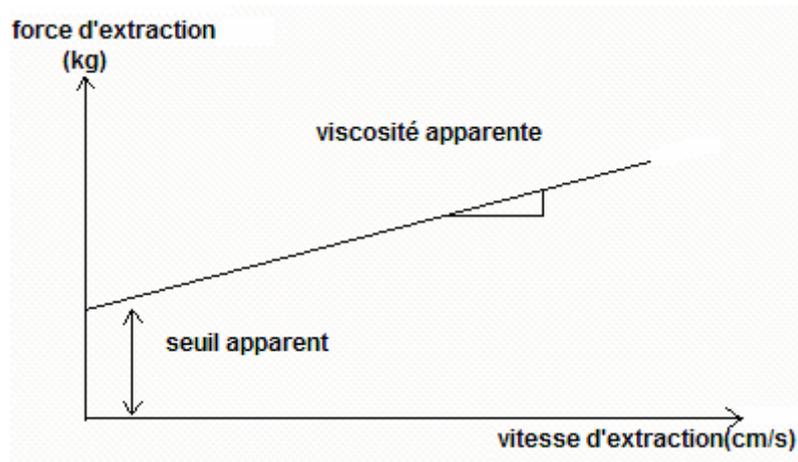


Figure III.2: résultat de l'essai.

### III.2 Essais sur béton frais :

Ce qui différencie le béton autoplaçant du béton ordinaire c'est surtout son comportement à l'état frais, car le BAP est plus fluide et plus homogène. **La fluidité et la stabilité** sont les deux paramètres qui permettent de donner une appréciation sur les caractéristiques du béton (à l'état frais).[9]

Avant d'accepter une formulation comme celle d'un BAP il faut s'assurer que ce béton possède les qualités espérées, le béton autoplaçant doit vérifier : la fluidité, la stabilité, l'aptitude au remplissage, la déformabilité, la résistance à la ségrégation (statique et dynamique), la résistance au ressuage et au tassement.

Pour évaluer ces caractéristiques des équipes de recherches ont développées plusieurs types d'essais, en mettant en jeu l'écoulement du béton dans une zone confinée. [8,9]

#### III.2.1 Essais de La fluidité :

##### III.2.1.1 Essais au cône d'Abrams :

L'essai au cône d'Abrams (figure III.3) est l'essai de référence pour évaluer la fluidité d'un BAP. Une observation visuelle de cet essai permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou pas. [9]

##### ◆ Mesure de l'étalement

L'affaissement au cône d'Abrams, habituellement évalué pour les bétons ordinaires, n'est pas représentatif pour un béton autoplaçant compte tenu de sa valeur très élevée. La fluidité d'un BAP est estimée en mesurant l'étalement du matériau à l'aide d'un cône (cône d'Abrams ou cône de DIN).

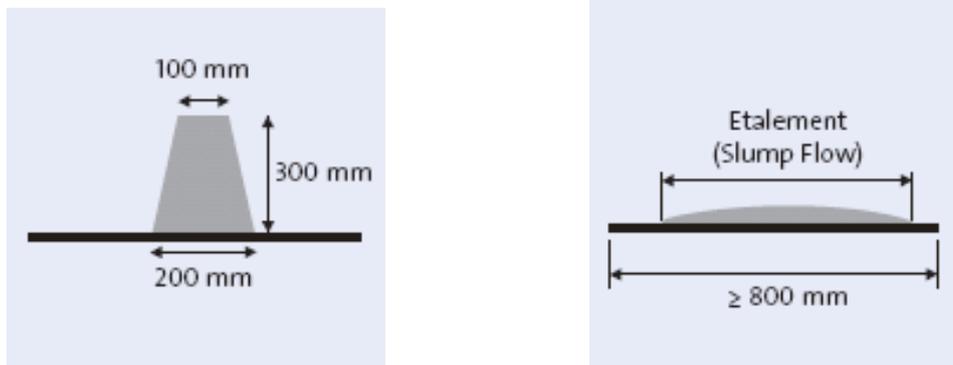
Le principe de cet essai est de réaliser une galette de béton et de mesurer son diamètre. Pour un BAP la valeur visée de l'étalement est de 60 à 75cm (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) avec un affaissement supérieur à 25 cm.

L'affaissement au cône d'Abrams est noté **slump flow**, alors que l'affaissement au cône de DIN est noté **flow table**.

il existe une corrélation entre l'étalement obtenu à l'aide du cône d'Abrams et celui obtenu à l'aide du cône DIN le tableau III.1 donne des valeurs à titre indicatif :

**Tableau III.1** : exemple de corrélation entre l'étalement au cône d'Abrams et l'étalement au cône DIN.

<b>Etalement au cône d'Abrams (mm)</b>	500	600	700
<b>Etalement au cône de DIN (mm)</b>	430	500	680



**Figure III.3** : essai d'étalement.

#### ◆ Mesure de la vitesse d'étalement

La vitesse d'étalement peut aussi nous renseigner sur la viscosité, l'ouvrabilité du béton est d'autant plus grande que la vitesse d'étalement est élevée.

Après soulèvement du cône, on chronomètre le temps nécessaire, pour que le béton forme un cercle de 50cm de diamètre on le note T50. Les valeurs de T50 obtenues pour cet essai vont de 4 jusqu'à 10 secondes l'équivalent d'une vitesse de 2,5 et 6,25cm/s.

Si une ségrégation apparaît lors de l'écoulement il est possible de modifier la fluidité du béton en ajoutant ou en diminuant la quantité de certains composants.

Par exemple si l'étalement est faible on peut augmenter le volume de la pâte, en maintenant le rapport (eau/liant) constant, ou alors augmenter le dosage en superplastifiant.

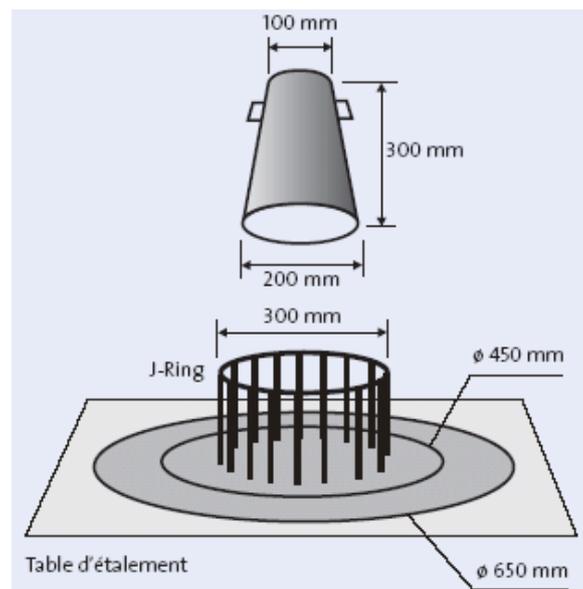
Dans le cas où la ségrégation apparaît sous forme de couronne de pâte, il convient de diminuer le dosage en superplastifiant ou d'augmenter celui de l'agent colloïdal ou alors d'augmenter le volume de la pâte mais toujours en maintenant le rapport (eau/liant) constant.

Le béton est un matériau hétérogène, et l'essai d'étalement ne met pas en relief l'importance de ce caractère, d'où la nécessité d'effectuer des essais qui testent son aptitude au remplissage. Pour cela plusieurs laboratoires ont bricolé leurs propres montages, c'est ce qui complique l'analyse de la littérature, mais le principe reste toujours le même.

### III.2.1.2 Essai d'étalement modifié (J-Ring)

Cet essai a le même principe que l'essai au cône, sauf que le béton s'écoule au travers de barres d'armatures. Le but est d'évaluer sa tendance au phénomène de blocage.

A cet effet le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique ; sur cet anneau de 300mm de diamètre sont soudées des barres d'armatures de diamètre 16 à 28 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. On déduit que le béton autoplaçant répond pleinement aux exigences recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et que la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau (figure III.4).



**Figure III.4 :** Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring).

### III.2.1.3 Essai de la boîte en L

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton frais en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptable.[5,8]

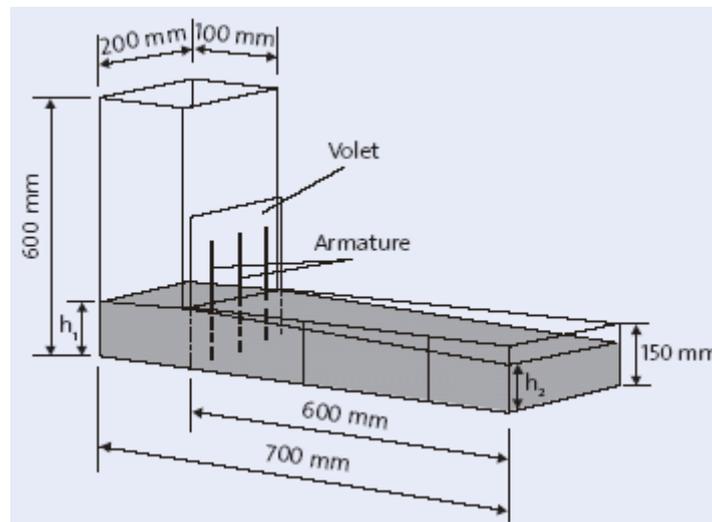
Le principe de cet essai figure III.5, est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte, laisser le béton se reposer 1 mn puis enlever la trappe et laisser le béton

s'écouler dans la partie horizontale à travers le ferrailage, On mesure les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  et on exprime le taux de remplissage  $H_2/H_1$ .

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrillés. Pour des applications moins ferrillées, il est possible d'alléger la grille en ne mettant que deux barres distantes de 58mm.

Selon le groupe association française de génie civil AFGC, le taux de remplissage doit être supérieur à **0,8**.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation, il convient donc de diminuer le rapport G/S (augmenter la quantité de sable, ou diminuer celle des graviers), ou d'augmenter le volume de la pâte en maintenant le rapport EAU/LIANT constant.



**Figure III.5:** boîte en L.

#### III.2.1.4 Essai de la table de fluidité : (par Kasai et coll1991)

Cet essai est semblable à l'essai d'étalement (flow table), il consiste à exécuter l'étalement sur un plateau circulaire de 670 mm de diamètre avec un bord élevé de 20mm. Par une manivelle on impose des mouvements de montée et descente avec une vitesse de 12,5mm/s.

On mesure le nombre l'amplitude correspondant a l'arrivée du béton au bord du plateau, au contact avec le demi périmètre, et au contact total avec le plateau.

### III.2.2 Mesure de la déformabilité, Essai du box (Kasaï et coll. 1999)

L'essai du box se fait à l'aide d'une boîte en plexiglas à deux compartiments séparés par une porte coulissante. On verse une quantité de béton dans un des deux compartiments de la boîte et on lève la porte coulissante, le matériau passe alors de son compartiment vers l'autre. Après stabilisation du béton on mesure la dénivellation entre les deux niveaux (compartiments), une faible dénivellation est signe d'une bonne déformabilité. [8]

### III.2.3 Essai de la stabilité

#### III.2.3.1 Essai de l'entonnoir en forme de V

Le principe de cet essai est de mesurer le temps d'écoulement du béton dans un espace limité (figure III.6), l'essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement. [6]

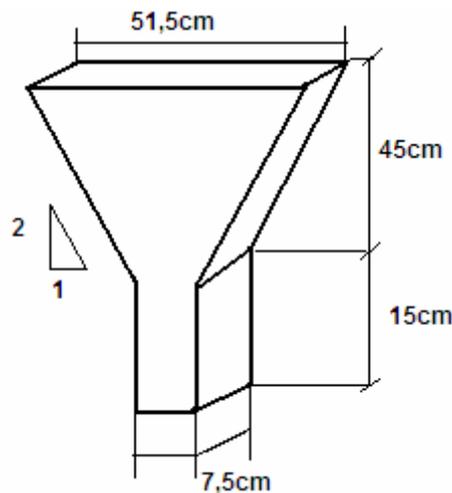


Figure III.6 : Essai de l'entonnoir en forme de V d'après SAKATA.

#### III.2.3.2 Essai de tassement

L'essai est effectué sur des colonnes de béton, une plaque circulaire en plexiglas est fixée sur la surface du béton frais et ancrée à l'aide de boulons. On met au contact de la plaque une aiguille de la longueur d'un comparateur de détection de déplacement à grande précision. [9]

On note la variation du tassement au cours du temps jusqu'à prise du béton (stabilité).

On calcule alors le tassement relatif ( $T_R$ ) en divisant la valeur maximale du tassement ( $T_{max}$ ) par la hauteur de la colonne ( $H$ ), cette valeur doit être minimale.

$$T_R (\%) = (T_{max} / H) \times 100$$

On peut aussi mesurer l'eau de ressuage externe apparue sur la plaque de plexiglas.

Après durcissement du béton, on peut scier les colonnes verticalement pour avoir une idée sur la résistance à la ségrégation du béton (figure III.7).

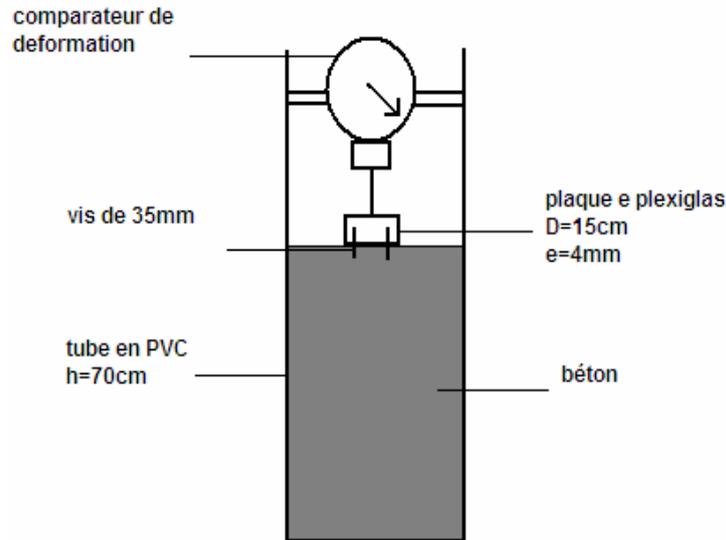


Figure III.7 : Essai du tassement (MANAI ,1995).

### III.2.4 Essais de ségrégation statique

Il n'existe pas d'essai propre à la ségrégation statique, plusieurs systèmes ont été conçus pour mettre en évidence le comportement du béton autoplaçant dans des zones confinées. Ces essais aident à évaluer la résistance du béton à la ségrégation. [9,20]

### III.2.5 Ségrégation dynamique

#### III.2.5.1 Essai de la stabilité au tamis

L'essai de la stabilité au tamis (figure III.8) permet de qualifier les bétons autoplaçants vis à vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un sceau, puis couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis.

On peut considérer qu'une valeur inférieure à 15 % de laitance est caractéristique d'un béton stable.[5]

**Critères d'acceptabilité** : La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçants de la façon suivante :

$0\% \leq P_{\text{laitance}} \leq 15\%$  → stabilité satisfaisante

$15\% < P_{\text{laitance}} \leq 30\%$  → stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ)

$P_{\text{laitance}} > 30\%$  → stabilité très mauvaise

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux.

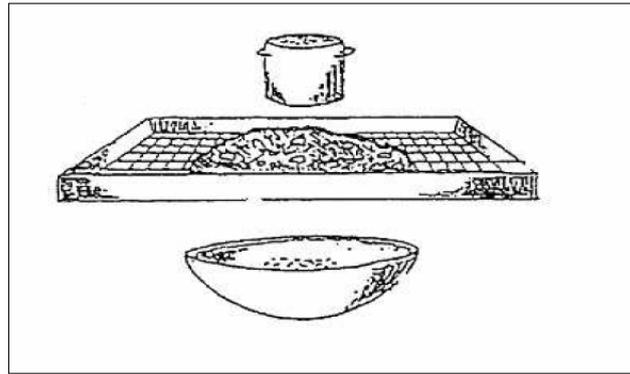


Figure III.8 : Essai de la stabilité au tamis.

### III.2.5.2 Essai du tube en U

Le tube en U (figure III.9) est composé de deux parties R1 et R2 séparées par une trappe. L'essai consiste à remplir la partie R1 puis à ouvrir la trappe et laisser le béton s'écouler librement. Après écoulement on mesure la hauteur de remplissage dans la partie R2, celle-ci doit être supérieure à 30cm pour un BAP.[8]

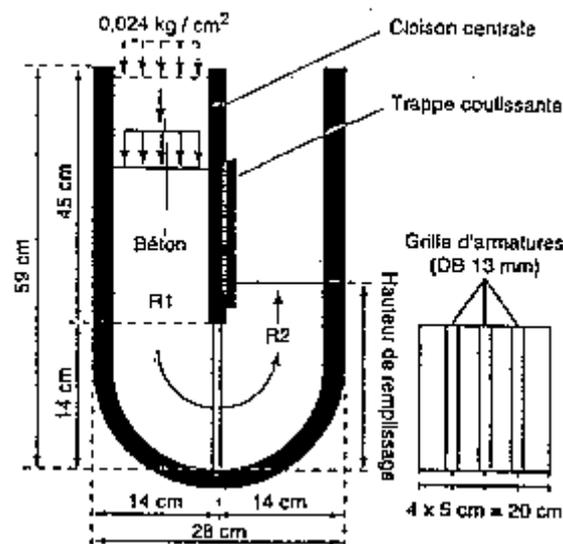


Figure III.9 : Essai du tube en U.

### III.2.5.3 Essai du caisson

L'essai de la figure III.10 sert à évaluer l'aptitude au remplissage du béton.

La quantité de béton nécessaire pour effectuer l'essai est de l'ordre de 35 litres. Le principe est de remplir la partie X jusqu'à atteindre les 22cm, on caractérise l'aptitude de remplissage du béton avec le ratio  $A / (A+B)$  avec :

A : partie remplie par le béton ;

B : partie non remplie par le béton.

Un béton peut être considéré comme BAP si le rapport est supérieur à 60%. [5]

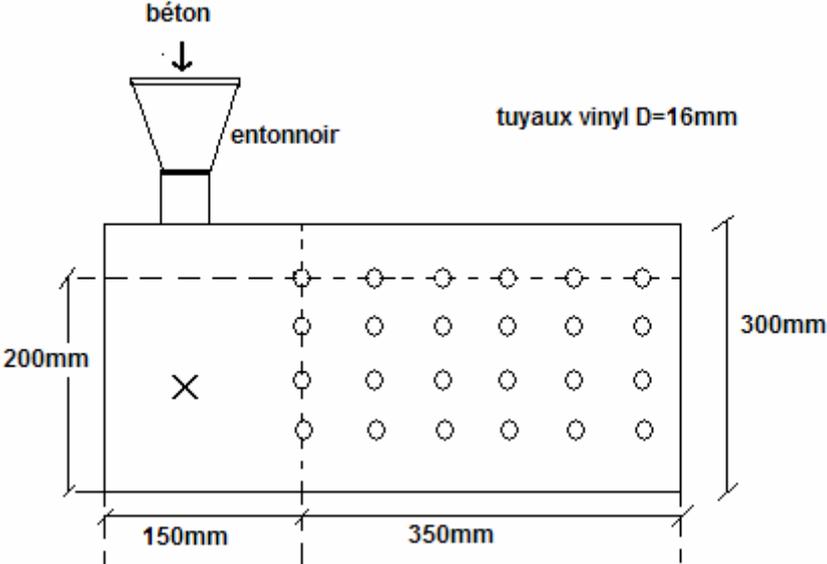


Figure III.10 : Essai du caisson.

## **Chapitre IV :**

**Fabrication, transport et mise en place des**

**BAP.**

## **Chapitre IV : Fabrication, transport et mise en place des BAP.**

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier.[9]

L'intensité et le temps de malaxage ainsi que l'ordre d'introduction des constituants sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton, sur l'effet optimal des additions et des adjuvants, c'est la raison pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité du malaxeur.

En raison de sa fluidité élevée, le béton autoplaçant doit être transporté en camion malaxeur. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres : le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier. Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire.

Il est important d'appliquer les procédures de fabrication rigoureusement également pour les facteurs qui paraissent moins importants et qui sont négligés dans le cas d'un béton vibré, comme les résidus d'adjuvants dans le malaxeur, ou le reste d'eau dans le camion malaxeur, qui peuvent entraîner certains problèmes. [23]

Par rapport au béton vibré la mise en place du béton autoplaçant est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon trois méthodes différentes :

La première méthode est celle utilisée pour les bétons ordinaires vibrés, la mise en place se fait à l'aide d'une goulotte. Pour limiter le phénomène de ségrégation favorisé par ce procédé il convient de fixer la hauteur de chute maximale du béton à 5m.

La deuxième méthode consiste à utiliser un tube plongeur immergé dans le béton frais, dans la partie inférieure du coffrage.

La mise en place des BAP peut se faire par pompage, par cette troisième méthode il y a réduction du bullage et obtention de parements lisses.

Pour réussir les ouvrages en béton autoplaçant il est capital d'appliquer scrupuleusement les recommandations de fabrication, de transport et de mise en œuvre. Dans certains cas il est nécessaire de procéder à des essais de faisabilité et de mise au point. [24]

**PARTIE 2 :**  
**PARTIE EXPERIMENTALE**

**Chapitre V :**  
**Objectifs de l'étude.**

## Chapitre V : Objectifs de l'étude.

### Introduction :

Les objectifs de cette étude expérimentale ont été d'une part de développer une formulation pour les bétons autoplaçants, et d'autre part de caractériser leurs performances physiques et mécaniques à partir d'essais appropriés, ceci permet de les valider en tant que BAP et d'évaluer leur aptitude à remplacer les bétons traditionnels vibrés.

Pour cela nous avons choisi de faire varier quelques paramètres tels que le dosage en superplastifiant et en fines, pour un même type de matériau et un dosage en ciment constant. Le dosage en eau n'a été modifié que lors de l'élaboration d'un seul BAP.

Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un béton ordinaire élaboré avec les mêmes constituants et le même dosage en ciment.

Les essais ont été réalisés au Laboratoire Centrale des Travaux Publics (LCTP) de Hussein Dey d'Alger, le matériel utilisé pour la caractérisation du béton autoplaçant à l'état frais a été mis à notre disposition par le CNERIB.

### Variables de l'étude :

Les bétons ont été élaborés avec les mêmes granulats :

Gravier calcaire (lavé) de KEDDARA de classe : 3/8 et 5/15

Sable concassé lavé de KEDDARA de classe : 0/3

Ciment CPJ 42.5 R

Les ajouts utilisés :

Un superplastifiant haut réducteur d'eau, MEDAFLOW 30, fourni par l'entreprise GRANITEX.

La fumée de silice, MEDAPLAST, fourni par l'entreprise GRANITEX.

Paramètres à varier :

Dosage en superplastifiant

Dosage en eau

Présence d'ajout minéral (fumée de silice)

Dosage en fumée de silice

Bétons élaborés :

- ❖ Béton ordinaire (témoin).
- ❖ Un BAP1 sans ajouts minéraux avec un dosage en super plastifiant de 1,25 %C, avec  $E/C = 0,4$ .
- ❖ Un BAP2 sans ajouts minéraux avec un dosage en super plastifiant de 1,6 %C, avec  $E/C = 0,4$ .
- ❖ Un BAP3 sans ajouts minéraux avec un dosage en super plastifiant de 1,6 %C et une diminution de la quantité d'eau. (avec  $E/C = 0,38$ ).
- ❖ Un BAP4 avec un ajout minéral (fumée de silice dosage 5%C) et un dosage en super plastifiant de 1,6 %C, avec  $E/C = 0,4$ .
- ❖ Un BAP5 avec ajouts minéraux (fumée de silice dosage 10%C) et un dosage en super plastifiant de 1,6 %C, avec  $E/C = 0,4$ .

Les essais effectués sur chacun de ces bétons à l'état frais et à l'état durci ont permis de montrer l'influence de :

- ⇒ La variation du dosage en superplastifiant
- ⇒ La variation de la quantité d'eau
- ⇒ La présence d'un ajout minéral
- ⇒ La variation du dosage de l'ajout minéral

Dans ce cadre :

54 éprouvettes cubiques (15×15) cm ont été confectionnées, soit 9 pour chaque type de béton, pour la mesure de la résistance à la compression simple à 3, 7 et 28 jours.

54 éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm, soit 9 pour chaque type de béton, pour l'essai de traction par flexion à 3, 7 et 28 jours.

Le choix des éprouvettes cubiques se justifie par l'insuffisance de la gâchée (quantité de béton) pour des éprouvettes cylindriques.

**Chapitre VI :**  
**Procédure expérimentale**

## Chapitre VI : Procédure expérimentale.

### VI.1 Identification des matériaux

Avant d'entamer une formulation il est nécessaire de connaître les matériaux utilisés à cet effet. Leurs caractéristiques sont déterminées au moyen d'un certain nombre d'essais, ces essais sont pour la plupart normalisés. La convenance de ces matériaux étant établie grâce aux spécifications. [25]

#### VI.1.1 Essais sur granulats

##### VI.1.1.1 Echantillonnage (NF P18-553)



Photo VI.1: Echantillonneur. [26]

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 (photo VI.1).

##### VI.1.1.2 Analyse granulométrique :

Il s'agit de fractionner le matériau au moyen d'une série de tamis pour déterminer sa classe [28]. Les analyses granulométriques établies pour chaque fraction sont représentées dans les tableaux VI.1, VI.2 et VI.3:

**Tableau VI.1** : Analyse granulométrique du gravier 5/15.

<b>Gravier 5/15</b>			
<b>Poids de l'échantillon :</b> 3000 g		<b>Fond de tamis :</b> 2998 g	
<b>Ouvertures des tamis (mm)</b>	<b>Refus cumulé (g)</b>	<b>Refus cumulé (%)</b>	<b>Tamisât (%)</b>
16			100
12.5	137	4.57	95.43
10	1026	34.29	65.71
8	2286	76.40	23.60
6.3	2992	100	

**Tableau VI.2** : Analyse granulométrique du gravier 3/8.

<b>Gravier 3/8</b>			
<b>Poids de l'échantillon :</b> 2000 g		<b>Fond de tamis :</b> 1997 g	
<b>Ouvertures des tamis (mm)</b>	<b>Refus cumulé (g)</b>	<b>Refus cumulé (%)</b>	<b>Tamisât (%)</b>
8			100
6.3	253	12.68	87.32
5	559	28.02	71.98
2.5	1650	82.70	17.30
1.25	1967	98.59	1.41
0.63	1995	100	

**Tableau VI.3** : Analyse granulométrique du sable (0/3)

<b>Sable 0/3</b>			
<b>Poids de l'échantillon :</b> 1600 g		<b>Fond de tamis :</b> 1596 g	
<b>Ouvertures des tamis (mm)</b>	<b>Refus cumulé (g)</b>	<b>Refus cumulé (%)</b>	<b>tamisât (%)</b>
5			100
2.5	28	1.78	98.22
1.25	506	32.22	67.78
0.63	963	61.33	38.67
0.315	1266	80.63	19.37
0.16	1478	94.14	15.86
0.080	1570	100	

### V.1.1.3. Densités (absolue et apparente)

La densité absolue est le rapport de la masse spécifique à la masse d'un égal volume d'eau, alors que la densité apparente est le rapport de la masse volumique à la masse d'un égal volume d'eau. Ce rapport est donc sans dimension.

Le tableau VI.4 représente les valeurs des densités pour les trois fractions des granulats

**Tableau VI.4:** densités apparente et absolue des granulats.

Granulat	Gravier 5/15	Gravier 3/8	Sable 0/3
Densité absolue	2,66	2,64	2,67
Densité apparente	1,40	1,38	1,50

### VI.1.1.4 Coefficient d'absorption et Porosité (NF P18-554) :

La porosité est le rapport du volume des vides au volume réel (apparent) de l'échantillon.

Le coefficient d'absorption est le rapport de la masse d'eau absorbée par le matériau jusqu'à saturation à la masse de l'échantillon sèche.

Le tableau VI.5 résume les résultats obtenus.

**Tableau VI.5 :** coefficient d'absorption et porosité.

Granulat	Gravier 5/15	Gravier 3/8
Coefficient d'absorption (%)	0,67	0,67
Porosité	1,79	1,79

### VI.1.1.5 Propreté superficielle (NF P18-591) :

Cet essai permet de déterminer le pourcentage des éléments inférieur à 0,5 mm contenus dans le matériau.

Les résultats de l'essai effectué sur gravier sont présentés dans le tableau VI.6.

**Tableau VI.6:** propreté superficielle.

Granulat	Gravier 5/15	Gravier 3/8	Spécifications
Propreté superficielle %	0,23	1	≤ 2%

**VI.1.1.6 Coefficient de forme :**

Le coefficient de forme est déterminé pour les graviers uniquement, les valeurs obtenues par cet essai sont contenues dans le tableau VI.7.

**Tableau VI.7:** coefficient de forme

Granulat	Gravier 5/15	Gravier 3/8	Spécifications
<b>Coefficient de forme (CDF)%</b>	12	21	D<10mm CDF≤25 %  D>10mm CDF≤20%

**VI.1.1.7 Coefficient Los Angeles (NF P 18-573) :****Photo VI.2 :** Appareil de Los Angeles [28]

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

La mesure de ce coefficient (LA) permet d'évaluer la résistance à la fragmentation des graviers. Cet essai a été effectué sur les différentes classes de granulat (tableau VI.8).

**Tableau VI.8 :** résistance à la fragmentation (LA)

Granulat	Gravier 5/15	Gravier 3/8	Spécifications
<b>LA %</b>	18	18	< 15 très bon à bon 15-20 bon à moyen 20-30 moyen à faible > 30 médiocre

### VI.1.1.8 Coefficient Micro Deval (NF P 18-572) :

Pendant le malaxage du béton, les granulats sont projetés les uns aux autres, les plus durs risquant de casser les autres ; il faut donc s'assurer de leur capacité à être mélangés les uns aux autres sans s'effriter.



La mesure de ce coefficient (MDE) permet d'évaluer la résistance à l'usure du matériau.

Photo VI.3 : dispositif d'essai Micro Deval. [28]

Le tableau VI.9 représente les résultats obtenus.

Tableau VI.9 : résistance à l'usure (MDE)

Granulat	Gravier 5/15	Gravier 3/8	Spécifications
MDE	21	21	< 13 très bon à bon 13-20 bon à moyen 20-25 moyen à faible > 25 médiocre

### VI.1.2 Essais sur sable :

#### VI.1.2.1 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 tableau VI.10 présente le résultat obtenu.

Tableau VI.10: module de finesse du sable

Granulat	Sable 0/3	Spécifications
Module de finesse $M_f$	2,7	$2,8 < M_f < 3,2$ sable grossier $2,2 < M_f < 2,8$ sable moyen $1,8 < M_f < 2,2$ sable fin

### VI.1.2.2 Equivalent de sable (NF P18-598):

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'E.S. exprime le pourcentage de 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.

L'essai a donné le résultat présenté dans le tableau VI.11.

**Tableau VI.11:** valeur de l'équivalent de sable

Granulat	Sable 0/3	Spécification
Equivalent de sable %	85	70 à 80 pour un sable roulé > 65 pour un sable concassé

### VI.1.3 Essais sur ciment :

#### VI.1.3.1 La résistance mécanique du ciment (NF EN 196-1):

La détermination de la résistance réelle d'un ciment se fait par essais de traction / compression sur des éprouvettes de mortier à 3 et 28 jours.

La norme EN 196-1 (tableau VI.12) donne les spécifications qui permettent de déterminer la classe du ciment :

**Tableau VI.12:** différentes classes de ciment

Classe	Résistance à la compression (N/mm <sup>2</sup> )			Temps de début de prise (mn)
	R à 2j	R min à 28j	R max à 28j	
32,5	/	>32,5	<52,5	>90
32,5R	≥13,5			
42,5	≥12,5	>42,5	<62,5	>60
42,5R	≥20			
52,5	≥20	>52,5	/	
52,5R	≥30			

Les résultats des essais d'écrasements obtenus sur ce ciment sont :

Résistance à la compression à 2jours =  $30 \text{ N/mm}^2 \geq 30$

Résistance à la compression à 28jours =  $55,5 \text{ N/mm}^2 > 52,5$

Ces résultats permettent de classer le ciment en classe : **52,5R**

### VI.1.3.2 Le temps de prise (NF P15-473):

La mesure du temps de prise se fait sur un mortier à l'aide de l'appareil de Vicat.

Temps de prise = fin de prise – début de prise.

Le résultat obtenu après essai :

Durée de l'essai : de 09h40 à 13h10

Début de prise : 11h25

Temps de début de prise : 1h45mn > 60 minutes

Temps de prise : 03h30

La durée de temps de prise (1h45mn > 60mn) confirme la classe du ciment obtenue pour les résistances.

### VI.1.3.2 Analyse chimique :

L'analyse chimique du ciment a été effectuée au LCTP Laboratoire Central des Travaux Publics (Hussein Dey), Les différents composants chimiques sont notés :

- ⇒ Silice.....  $\text{SiO}_2$
- ⇒ Chaux .....  $\text{CaO}$
- ⇒ Magnésie .....  $\text{MgO}$
- ⇒ Carbonates..... $\text{CaCO}_3$
- ⇒ Anhydride carbonique..... $\text{CO}_2$
- ⇒ Eau de constitution..... $\text{H}_2\text{O}$
- ⇒ Oxyde ferrique..... $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- ⇒ Oxyde d'alumine..... $\text{Al}_2\text{O}_3$
- ⇒ Insolubles .....INS
- ⇒ Perte au feu .....PAF

Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux VI.13.

**Tableau VI.13:** composition chimique du ciment

Composition chimique (%)									
$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaCO}_3$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	INS	PAF
20,92	61,74	1,58	11,11	4,88	0,46	4,32	5,33	1,48	5,52

La composition chimique ne suffit pas pour caractériser un ciment, il est nécessaire de connaître les composés minéralogiques constitués lors de la fabrication du ciment à partir des composés chimiques. [10]

Les principaux composés minéralogiques formés sont :

- ⇒ Silicate tricalcique :  $(3\text{CaO SiO}_2)$  noté  $\text{C}_3\text{S}$
- ⇒ Silicate bicalcique :  $(2\text{CaO SiO}_2)$  noté  $\text{C}_2\text{S}$
- ⇒ Aluminate tricalcique :  $(3\text{CaO Al}_2\text{O}_3)$  noté  $\text{C}_3\text{A}$
- ⇒ Alumino-ferrite tétracalcique  $(4\text{CaO Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_3)$  noté  $\text{C}_4\text{AF}$

Le pourcentage de ces constituants est calculé à partir de la composition chimique par les formules de BOGUE suivantes :

- ⇒  $\text{C}_3\text{A} = 2,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,69 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
- ⇒  $\text{C}_3\text{S} = 4,07 \text{ CaO} - 7,60 \text{ SiO}_2 - 6,72 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,43 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 2,85 \text{ SO}_3$
- ⇒  $\text{C}_2\text{S} = 2,87 \text{ SiO}_2 - 0,754 \text{ C}_3\text{S}$
- ⇒  $\text{C}_4\text{AF} = 3,04 \text{ Fe}_2\text{O}_3$

Le tableau VI.14 donne le résultat de l'analyse minéralogique du ciment :

**Tableau VI.14:** composition minéralogique du ciment

Composition minéralogique %			
$\text{C}_3\text{A}$	$\text{C}_3\text{S}$	$\text{C}_2\text{S}$	$\text{C}_4\text{AF}$
7,62	44,53	26,46	13,13

#### VI.1.4 Caractéristiques des ajouts :

Les caractéristiques des ajouts utilisés ont été données dans la fiche technique fournie par l'entreprise GRANITEX. [29]

##### VI.1.4.1 Le superplastifiant :

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

##### Caractéristiques :

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

### VI.1.4.2 La fumée de silice :

La fumée de silice utilisée est le MEDAPLAST, conçue à base de micro silice. [30]

#### Caractéristiques :

Forme.....poudre

Couleur.....grise

Densité apparente .....1,07

Plage de dosage recommandée : 5 à 10% selon les performances recherchées.

#### Calcul de la densité absolue (NFT 66.007) :

La fumée de silice étant une poudre très fine, la détermination de sa densité absolue ne peut se faire à l'aide du pycnomètre pour gravier et de l'eau. On utilise donc un petit pycnomètre utilisé généralement pour les produits bitumineux et un produit liquide hydrocarbure (Toluène) La valeur obtenue après essais : 2,52

Le tableau VI.15 représente la composition chimique de la fumée de silice

**Tableau VI.15** : composition chimique de la fumée de silice.

Composition chimique (%)					
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
92,1	0,25	0,79	0,17	0,96	0,36

## VI.2 Elaboration des bétons :

### VI.2.1 Formulation d'un béton ordinaire :

Pour la formulation du béton ordinaire (vibré) qui est le béton témoin nous avons choisi la méthode de FAURY. Cette méthode par sa simplicité est très utilisée dans les laboratoires de béton. [15,16]

Les calculs effectués ci-dessous sont basés sur les courbes granulométriques obtenues précédemment. La courbe de référence est composée de deux segments de droites, tracés en joignant trois points :

- ◆ Premier point ( $D_{max}$ , 100%)
- ◆ Deuxième point ( $D_{max}/2$ , Y)
- ◆ Troisième point (0,0065 , 0)

Voir le tracé des courbes (granulométrique + courbe de référence + courbe du mélange) en annexe III.

**Calcul de D max :**

$D_{max}$  représente le diamètre maximal des granulats constituant le béton, il est calculé en se basant sur leurs granulométries par la formule suivante :

$$D_{max} = d_1 + (d_1 - d_2) \times (x / y)$$

Avec :

$d_1$  : diamètre du premier tamis sur lequel on a un refus

$d_2$  : diamètre du tamis qui suit  $d_1$

$x$  : proportion des grains retenus sur le tamis  $d_1$

$y$  : proportion des grains retenus entre  $d_1$  et  $d_2$

D'après l'analyse granulométrique on a :

$$d_1 = 12,5 \text{ mm} \quad ; \quad x = 4,57$$

$$d_2 = 10 \text{ mm} \quad ; \quad y = 95,43 - 65,71 = 29,72$$

$$D_{max} = 14,84 \text{ mm}$$

$$D_{max} / 2 = 7,42 \text{ mm}$$

**Calcul de Y :**

Y est l'ordonnée du point d'intersection des deux segments de droites de la courbe de référence. Sa valeur est donnée par la formule suivante qui tient compte de la nature des granulats et de la consistance désirée et même de la puissance de vibration et des dimensions du coffrage.

On a :

$$Y = A + 17 (D_{max})^{1/5} + B / (R/D - 0,75)$$

Avec :

A : coefficient qui dépend de la nature des granulats et de la consistance visée du béton. (voir annexe II).

$D_{max}$  : dimension maximale du granulat du béton.

B : coefficient dépendant de la puissance de serrage.

On prend pour un serrage moyen (béton mou)  $B = 1,5$  et pour un serrage énergique (béton ferme)  $B = 1,0$ .

R : rayon moyen du moule.

En masse indéfinie, la relation devient:

$$Y = A + 17 (D_{max})^{1/5}$$

Pour une consistance molle et des granulats concassés, on prend  $A = 34$ .

On aura alors :

$$Y = 63,15$$

On peut tracer la courbe de référence passant par ces 3 points : a, b, c :

a (14,84 ; 100)

b (7,42 ; 63,15)

c (0,0065 ; 0)

### Calcul de la quantité d'eau de gâchage :

Le volume d'eau nécessaire pour hydrater les constituants se détermine en calculant l'indice des vides du matériau.

L'indice des vides se calcule comme suit :

$$I = K / D_{\max}^{1/5}$$

Avec :

K : coefficient dépendant de la nature des granulats et de la consistance visée pour le béton. (voir annexe II)

Pour des granulats concassés et une consistance molle, K = 0,43

On aura l'indice des vides I :

$$I = K / D^{1/5} = 0,25 = 25\%$$

De ce fait, l'indice des vides représente le volume occupé par l'eau :  $E = 250 \text{ l/m}^3$

### Calcul des proportions des granulats :

Le pourcentage de chaque granulat est déterminé par le point d'intersection de la courbe de référence avec la verticale à l'axe des abscisses qui coupe les deux courbes granulométriques des constituants dont on doit assurer la continuité granulaire (puisque c'est le principe de la méthode de Faury)

Le volume d'eau étant maintenant déterminé, on peut calculer le volume total des matières sèches ( $VA_{MS}$ ) :

$$VA_{MS} = 1000 - 250 = 750 \text{ l}$$

Le volume de chaque constituant est déterminé en multipliant le  $VA_{MS}$  par le pourcentage du composant.

Le tableau VI.16 suivant résume le calcul des proportions de chaque constituant du béton.

**Tableau VI.16** : composition du béton témoin.

Composant	%	VA total de MS (l)	VA des composants (l)	Densité absolue	Composant (kg/m <sup>3</sup> )	Densité Apparente
Gravier 5/15	38	750	285	2,66	758,1	1,40
Gravier 3/8	19	750	142,5	2,64	376,1	1,38
Sable	21,5	750	161,25	2,60	419,25	1,50
Ciment	21,5	750	161,29	3,1	499,87	

**Tracé de la courbe du mélange :**

La courbe du mélange est tracée pour vérifier la validité de la composition choisie. La formulation est d'autant plus optimale que la courbe du mélange se rapproche de la courbe de référence.

Proportion des constituants en % :

Gravier 5/15 ..... 38%  
 Gravier 3/8 .....19%  
 Sable .....21,5%  
 Ciment .....21,5%

**Tableau VI.17** : composition du mélange

Diamètres des tamis (mm)	Pourcentage . Tamisat cumulé			Ciment (%)	Mélange (%)
	Gravier 5/15 (%)	Gravier 3/8 (%)	Sable (%)		
16	38	19	21,5	21,5	100
12,5	36,26	19	21,5	21,5	98,26
10	24,96	19	21,5	21,5	86,96
8	08,06	19	21,5	21,5	70,06
6,3	0	16,59	21,5	21,5	59,59
5	0	13,67	21,5	21,5	56,67
2,5	0	03,28	21,11	21,5	45,89
1,25	0	0,26	14 ,57	21,5	36,33
0,63	0	0	08,31	21,5	29,81
0,315	0	0	04,16	21,5	25,66
0,016	0	0	03,41	21,5	24,91
0,08	0	0	0	21,5	21,5

**VI.2 .2 Formulation du béton autoplaçant :**

Contrairement à la formulation du béton ordinaire témoin, pour la formulation du béton autoplaçant nous n'avons pas suivi une formulation classique.

Nous avons respecté les conditions nécessaires permettant de garantir l'autoplaçabilité tout en se basant sur des compositions proposées dans la littérature spécialisée [2,9].

Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1m<sup>3</sup> de béton en ayant comme données les paramètres suivants :

- ◆ Un rapport G/S = 1.
- ◆ Un rapport E/C relativement faible.
- ◆ Un dosage en ciment plutôt élevé.
- ◆ Un pourcentage déterminé en ajouts (superplastifiant, fumées de silice, ou encore les deux).

Pour pouvoir comparer les performances des différents bétons indépendamment de l'action du ciment, on a fixé le dosage de ce dernier à  $500 \text{ kg/m}^3$  pour tous les bétons testés.

### VI.2.2.1 Formulation du béton autoplaçant sans fumée de silice

#### a - avec une variation du dosage en superplastifiant :

Pour calculer les proportions des constituants dans un mètre cube on fixe les rapports suivants :

- ◆  $G/S = 1$  pour augmenter la quantité de sable, celle-ci 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%

Dans  $1\text{m}^3$  de béton on a les constituants suivants :

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

Avec :

- \*  $A = 5 \text{ l/m}^3$
- \*  $E/C = 0,4$  avec  $C = 500 \text{ kg/m}^3 = (500/3,1) \text{ l/m}^3 = 161,29 \text{ l/m}^3$

$$\text{On a donc } E = 200 \text{ l/m}^3$$

$$\text{On obtient alors } G + S = 1000 - 5 - 161,29 - 200 = 633,71 \text{ l}$$

Le rapport étant fixé à :  $G/S = 1$

On peut calculer les volumes G et S :

$$G = S = 316,855 \text{ l/m}^3$$

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de 5/15 et 50% du 3/8. On obtient la formulation suivante (tableau VI.18).

Le dosage en superplastifiant a été varié (1,25% C et 1,6% C).

**Tableau VI.18** : composition des BAP1 et BAP2.

Composant	Composant ( $\text{l/m}^3$ )	Densité absolue	Composant ( $\text{kg/m}^3$ )
Gravier 5/15	158,427	2,66	418,247
Gravier 3/8	158,427	2,64	421,415
Sable	316,855	2,60	823,823
Ciment	161,29	3,1	500
Superplastifiant 1,25%C	5,84	1,07	6,25
Superplastifiant 1,6%C	7,47	1,07	8

**b- Avec une diminution de la quantité d'eau :**

Dans le but d'étudier l'influence du dosage en eau, on a fait varier la quantité d'eau pour arriver à la quantité minimale nécessaire pour garantir le caractère autoplaçant. Nous avons abouti à une réduction et ainsi on est arrivé à n'utiliser que  $193 \text{ l/m}^3$  au lieu de  $200 \text{ l/m}^3$ , soit une diminution de la quantité d'eau de gâchage de seulement  $7 \text{ l/m}^3$ .

Le rapport E/C est donc de : 0,386.

On aura donc la formulation suivante (tableau VI.19):

**Tableau VI.19** : composition du BAP3

Composant	Composant ( $\text{l/m}^3$ )	Densité absolue	Composant ( $\text{kg/m}^3$ )
Gravier 5/15	160,17	2,66	426,07
Gravier 3/8	160,17	2,64	422,86
Sable	320,35	2,60	832,91
Ciment	161,29	3,1	500
Superplastifiant 1,6%C	7,47	1,07	8

**VI.2.2.2 Formulation du béton autoplaçant avec fumée de silice :**

Pour formuler un BAP avec un ajout minéral on utilise la même formulation que pour un BAP sans ajout minéral (fumée de silice), mais vue l'importance de la quantité de l'ajout dans le mélange (quantité non négligeable). La présence de cet ajout est prise en compte dans le calcul des constituants.

On a alors les formulations suivantes à différents dosages en fumée de silice, dosages pris égaux aux valeurs limites extrêmes préconisées par la littérature (5% et 10%).

**a - Dosage en fumée de silice (FS) 5%C :**

Si on prend un dosage en fumée de silice de 5% C on a :

$$FS = 5\% C = 25 \text{ kg /m}^3 = (25 / 2,52) \text{ l/m}^3 = 9,92 \text{ l/m}^3$$

Les constituants présents dans le mélange sont :

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

Avec:

$$* A = 5 \text{ l/m}^3$$

$$* E/C = 0,4, C = 500 \text{ kg /m}^3 = (500/3,1) \text{ l/m}^3 = 161,29 \text{ l /m}^3$$

$$\text{On a donc } E = 200 \text{ l /m}^3$$

On peut calculer les proportions des graviers et du sable :

$$G+S = 1000 - (5 + 161,29 + 200 + 9,92) = 623,79 \text{ l}$$

$$\text{Avec } G/S = 1$$

$$\text{On a donc : } G = S = 311,89 \text{ l/m}^3$$

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de 5/15 et 50% du 3/8.

Composant	Composant (l/m <sup>3</sup> )	Densité absolue	Composant (kg/m <sup>3</sup> )
Gravier 5/15	155,94	2,66	411,70
Gravier 3/8	155,94	2,64	414,81
Sable	311,89	2,60	810,92
Ciment	161,29	3,1	500
Superplastifiant 1,6%C	7,47	1,07	8
Fumées de silice	9,92	2,52	25

### b - Dosage en fumée de silice 10%C :

Le principe est le même que précédemment (§a), le dosage en FS passe à 10% :

$$G + S + C + E + A + FS = 1000l$$

Avec :

- \*  $A = 5 \text{ l/m}^3$
- \*  $E/C = 0,4$  avec  $C = 500 \text{ kg /m}^3 = (500/3,1) \text{ l/m}^3 = 161,29 \text{ l /m}^3$   
On a donc :  $E = 200 \text{ l /m}^3$
- \*  $FS = 10\% C = 50 \text{ kg /m}^3 = (50 / 2,52) \text{ l/m}^3 = 19,84 \text{ l/m}^3$

$$G + S = 1000 - 5 - 161,29 - 200 - 19,84 = 623,79 \text{ l}$$

$$G/S = 1$$

$$\text{On a donc : } G = S = 306,93 \text{ l/m}^3$$

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de 5/15 et 50% du 3/8.

**Tableau VI.20** : composition d'un BAP avec 10% de fumée de silice.

Composant	Composant (l/m <sup>3</sup> )	Densité absolue	Composant (kg/m <sup>3</sup> )
Gravier 5/15	153,46	2,66	405,13
Gravier 3/8	153,46	2,64	408,20
Sable	306,93	2,60	798,01
Ciment	161,29	3,1	500
Superplastifiant 1,6%C	7,47	1,07	8
Fumée de silice	19,84	2,52	50

### VI.2.3 Préparation de la gâchée :

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  $1/20^{\text{ème}}$  du  $\text{m}^3$ .

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules cubiques /prismatique 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. Le superplastifiant est ajouté à première moitié de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, fumées de silice) 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 graduellement.
- Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration pour le béton autoplaçant et les vibrer à l'aide de la table vibrante pour le béton ordinaire.

### VI.2.4 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  $20^{\circ}\text{C}$ , ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment .

**Chapitre VII :**  
**Essais sur bétons : résultats et interprétation**

## Chapitre VII : Essais sur bétons : résultats et interprétations.

### Introduction :

Les essais effectués sur les bétons permettent de caractériser leurs performances physiques et mécaniques, de conclure sur leur nature (autoplaçant ou non) et sur les types d'applications dans lesquelles ils pourront être utilisés (verticales ou horizontales). Les modes opératoires complets de ces essais sont donnés en annexe.

Les caractéristiques et propriétés qui ont été appréhendées concernent la rhéologie et les performances mécaniques :

- ⇒ L'étalement au cône d'Abrams
- ⇒ La stabilité au tamis
- ⇒ La capacité de remplissage
- ⇒ La porosité
- ⇒ La résistance à la compression
- ⇒ La résistance à la traction

### VII.1 Essais sur béton frais :

#### VII.1.1 Essais au cône d'Abrams :

Cet essai est habituellement effectué pour le béton vibré dans le but de déterminer sa consistance par mesure de l'affaissement, c'est ce qui a été fait pour le béton témoin.

Pour un BAP cet essai permet de mesurer la mobilité du béton en milieu non confiné. Il consiste à mesurer le diamètre d'une galette de béton (figure VII.1, VII.2) après soulèvement du cône.

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



Figure VII.1 : étalement d'un BAP



Figure VII.2 : essai d'étalement

Les résultats obtenus par cet essai sur les différents bétons sont présentés dans le tableau VII.1.

**Tableau VII.1** : résultats de l'essai au cône d'Abrams

Béton	BO	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Étalement (cm)	/	62	71	72	74	68
Affaissement (cm)	8,5	Affaissement total				

Lorsqu'on augmente le dosage en superplastifiant de 1,25% (BAP1) à 1,6%(BAP2) on note une amélioration de la fluidité du béton de 62 à 71cm.

La diminution de la quantité d'eau (BAP3) n'influe pas sur la fluidité vue sa petite variation.

Le BAP4, dosé à 5% de fumée de silice, a une meilleure fluidité que celle du BAP5 dosé à 10% de FS.

#### VII.1.2.Essai de la boîte en L :

L'essai de la boîte en L (figureVII.3) est effectué pour le béton autoplaçant seulement. Il permet d'évaluer le risque de blocage et la capacité de remplissage du béton en milieu confiné.

La partie verticale de la boîte est remplie de béton, après soulèvement de la trappe en acier, on mesure le taux de remplissage qui est défini comme étant le rapport des hauteurs de béton dans les parties verticales. Pour un BAP,  $H1/H2$  doit être supérieur à 0,8.



**Figure VII.3:** boîte en L

Les résultats des essais effectués sur les différents BAP sont présentés dans le tableau VII.2.

**Tableau VII.2:** essai de la boîte en L

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Capacité de remplissage (H1/H2)	0,59	0,89	0,83	0,85	0,64

On remarque que la capacité de remplissage est supérieure à 0,8 pour tous les BAP sauf pour le BAP1 (dosage de 1,25% de superplastifiant) et le BAP5 (dosage de 10% en fumée de silice).

### VII.1.3 Essai de la stabilité au tamis :

Lors de l'essai d'étalement une observation visuelle peut nous renseigner sur la stabilité du béton (absence de ségrégation et de ressuage), mais l'essai le plus approprié pour la mesure de la stabilité est l'essai de stabilité au tamis (figureVII.4).

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 VII.4 :** essai de stabilité au tamis

Cet essai a été effectué sur tous les BAP, le tableau VII.3 présente les résultats obtenus.

**Tableau VII.3:** résultats de l'essai de la stabilité

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Poids de laitance %	6	10	9	3	2

Les trois premiers BAP présentent une stabilité moyenne de 5 à 10%. Alors que les deux derniers, contenant la fumée de silice, se caractérisent par une grande stabilité (< 5%).

## VII.2 Essais sur béton durci :

### VII.2.1 Essai de compression (NF P 18-406) :

L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale (figure VII.5.a). La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette (figure VII.5.b).

On note la charge maximale atteinte  $P$  (MN) et la surface de chargement  $S$  (m<sup>2</sup>), la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

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

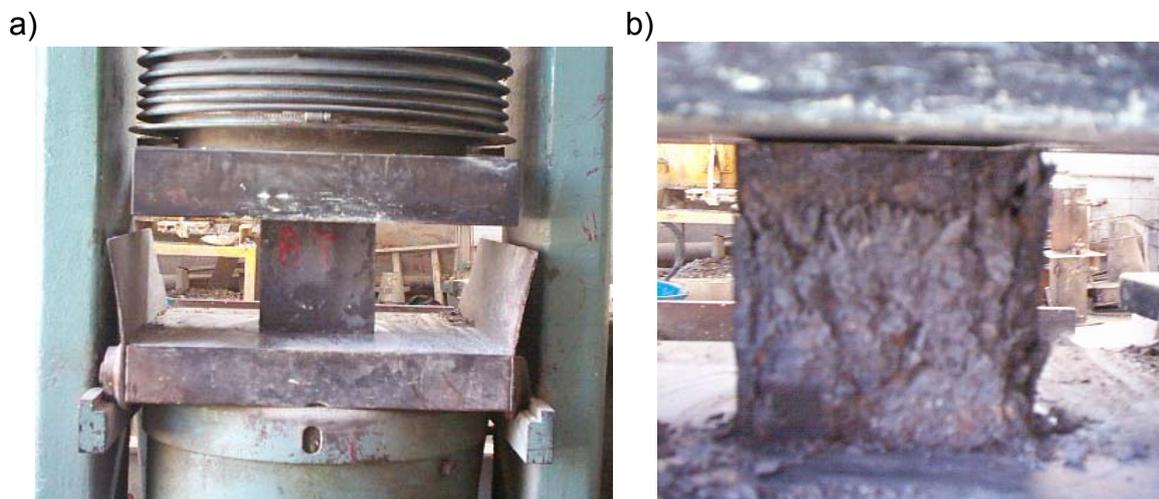
Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cubiques de 15 cm de côté, la contrainte maximale s'écrit :

$$\sigma_c \text{ (MPa)} = P / a^2$$

$P$  : charge de rupture

$a$  : arête de l'éprouvette cubique (15cm)

$\sigma_c$  : résistance à la compression



**Figure VII.5** : essai de compression.

a) éprouvette avant écrasement. b) éprouvette après écrasement

L'objectif de cet essai est de suivre l'évolution de la résistance à la compression et le comportement des différents BAP.

Les essais effectués sur les différents bétons à différents âges (3, 7, 28 jours) ont donné les résultats présentés dans le tableau (VII.4).

**Tableau VII.4** : résistance à la compression des bétons étudiés.

Béton	Résistance à la compression (bars)		
	3 jours	7 jours	28 jours
<b>BO</b>	320	403	446
<b>BAP1</b>	350	433	459
<b>BAP2</b>	380	462	551
<b>BAP3</b>	396	475	560
<b>BAP4</b>	412	479	591
<b>BAP5</b>	460	524	630

On constate que les différents bétons autoplaçants testés ont un meilleur comportement à la compression que le béton ordinaire (témoin), même au jeune âge, en particulier les BAP avec fumée de silice.

### VII.2.2 Essai de traction par flexion (NF P 18-407) :

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes de sections carrées (7x7x28) cm. Le prisme est placé dans une machine automatique de flexion (figureVII.6.a) et est soumis à une charge croissante jusqu'à sa rupture (figureVII.6.b).

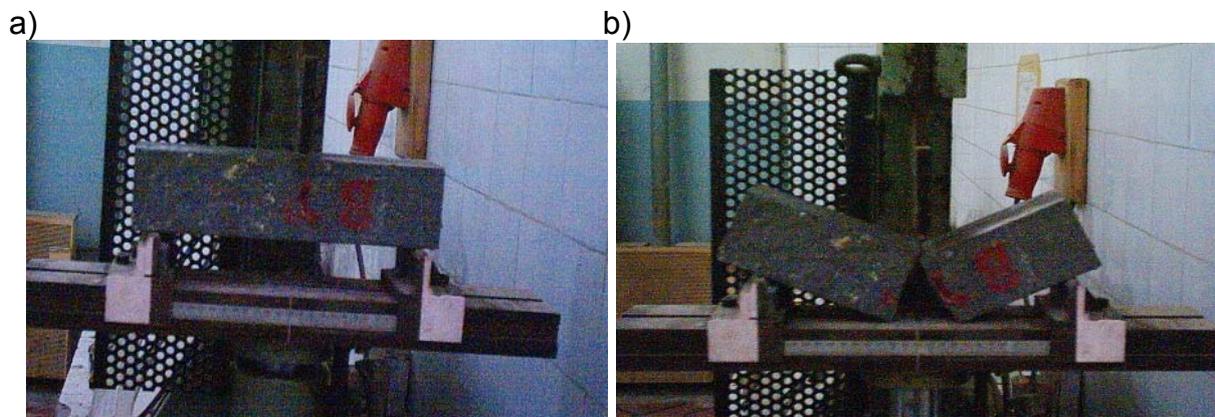
On note alors la charge de rupture P.

La résistance à la traction s'écrit :

$$\sigma_T \text{ (MPa)} = 1,8 (P/a^2)$$

P : charge de rupture

A : coté de l'éprouvette prismatique (axax4a)



**Figure VII.6:** traction par flexion

a) prisme avant la rupture b) prisme après la rupture du prisme

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau VII.5

**Tableau VII.5** : résistance à la traction des bétons étudiés

Béton	Résistance à la traction (bars)		
	3 jours	7 jours	28 jours
<b>BO</b>	33,53	46,63	50,30
<b>BAP1</b>	49,52	45,06	60,26
<b>BAP2</b>	42,44	52,4	45,06
<b>BAP3</b>	50,30	52,4	58,68
<b>BAP4</b>	44,01	47,16	57,64
<b>BAP5</b>	45,06	50,30	60,78

On note que la résistance à la traction représente à peu près le 1/10<sup>ème</sup> de la résistance à la compression, ces résultats permettent de vérifier la cohérence des résultats et de valider les essais mécaniques.

Il est à remarquer que la résistance à la traction du BAP2 chute à 28jours, ce qui est incohérent ; une erreur de manipulation a dû provoquer ce résultat aberrant.

### VII.2.3 Calcul de la porosité :

La porosité (P) est définie comme étant le rapport du volume des vides ( $V_v$ ) au volume apparent ( $V_{app}$ ) du matériau.[19]

$$P = V_v/V_{app}$$

Dans notre étude la porosité a été déterminée pour tous les bétons à 28jours, ceci dans le but d'avoir une idée sur leur compacité des différents.

Pour cela on a utilisé la formule suivante :

$$P (\%) = M' - M / M$$

P : porosité en %.

M : masse de l'échantillon séché.

M' : masse de l'échantillon saturé en eau.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau VII.6 :

**Tableau VII.6** : Mesure de la porosité à 28 jours :

Béton	BO	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Porosité %	5,07	4,86	4,89	4,64	3 ,44

### VII.2.4 Récapitulatif des résultats :

Le tableau VII.7 est un récapitulatif des performances des différents types de bétons à l'état frais et durci.

**Tableau VII.7** : récapitulatif des résultats d'essais effectués sur différents types de bétons

Béton	Étalement (cm)	Boite en L (H1/H2)	Stabilité au tamis (%)	Résistance à la compression (bars)			Porosité (%)
				3 jours	7 jours	28 jours	
BO	/	/	/	320	403	446	5,07
BAP1	62	0,59	6	350	433	459	/
BAP2	71	0,89	10	380	462	551	4,86
BAP3	72	0,83	9	396	475	560	4,89
BAP4	74	0,85	3	412	479	591	4,64
BAP5	68	0,64	2	460	524	630	3,44

### VII.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.
- ❖ le phénomène de blocage pour l'essai de la boîte en L.
- ❖ la maniabilité du béton lors du malaxage.
- ❖ le temps de prise, éventuellement le phénomène de fausse prise du béton.
- ❖ le ressuage et la stabilité lors du remplissage des moules.
- ❖ la ségrégation statique et l'homogénéité après écrasement des éprouvettes.

### VII.3 Discussion et interprétation des résultats :

D'après les résultats présentés dans le tableau précédent, on peut facilement apercevoir une nette amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçant par rapport au béton ordinaire.

En effet, les bétons autoplaçants présentent de meilleures caractéristiques rhéologiques, dues à l'incorporation d'ajouts chimiques (superplastifiant) et d'ajouts minéraux (fumée de silice).

### **VII.3.1 Propriétés rhéologiques :**

#### **VII.3.1.1 Effet du superplastifiant :**

D'après les essais d'étalements effectués au cône d'Abrams, on constate que pour le BAP1 (1,25%SP) la valeur de l'étalement est de 61cm. Cette valeur est inférieure aux spécifications (65cm) 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 BAP2, dosé à 1,6% de SP, l'étalement atteint 71cm. 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.

Les résultats de l'essai de la stabilité au tamis permettent de qualifier les BAP 1 et 2 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 le petit pourcentage d'agent de viscosité incorporé dans le superplastifiant lors de sa fabrication.

Les valeurs obtenues par l'essai de la boîte en L, confirment les résultats des deux essais précédents. La capacité de remplissage (H1/H2) d'un BAP doit être supérieure à 0,80. Dans notre cas, elle est de 0,89 pour le BAP2 et de seulement 0,59 pour le BAP1. Lors de la réalisation de l'essai on remarque que le BAP2 présente de meilleures performances vis-à-vis du phénomène de blocage au niveau des armatures.

#### **VII.3.1.2 Effet de la variation de la quantité d'eau :**

Le BAP3 a un comportement rhéologique similaire à celui du BAP2, ceci s'explique par le fait que les compositions de ces deux bétons ne diffèrent pas beaucoup. La diminution de la quantité d'eau est de l'ordre de  $7 \text{ l/m}^3$ , cette valeur est négligeable devant la quantité d'eau de gâchage qui est de  $200 \text{ l/m}^3$ .

#### **VII.3.1.3 Effet de l'ajout minéral (FS):**

Les BAP4 et 5 contenant tous les deux des fines ont eu des comportements différents. Le BAP4 dosé à 5% de fumée de silice, présente une fluidité élevée (74cm), alors que pour le BAP5, on note une diminution de la fluidité (68cm).

On peut expliquer ce phénomène par le fait que : la fumée de silice incorporée à petit dosage augmente le volume de pâte dans le béton. De ce fait, elle améliore la maniabilité, la cohésion entre les constituants, ce qui crée une bonne harmonie dans le mélange. Mais lorsque ce dosage est élevé, pour un même rapport E/C et un dosage constant en SP, il peut causer une perte de la fluidité.

La fumée de silice est une poudre ultrafine qui se caractérise par une grande surface spécifique. Sa présence dans le béton à fort dosage augmente la demande en eau.

Pour pouvoir maintenir un bon étalement, il est nécessaire d'augmenter la quantité d'eau présente dans le mélange (augmentation du rapport E/C ou du dosage en SP).

La croissance considérable du volume de pâte par ajout de fumée de silice améliore largement la stabilité : on note une stabilité de 2% pour le BAP5, contre une stabilité de 3% pour le BAP4, et 9% pour un BAP ne contenant pas de fumées de silice.

Le BAP4 dosé à 5% de FS se caractérise par une bonne stabilité et une bonne fluidité, mais aussi par une bonne capacité au remplissage qui est assurée par l'action combinée du superplastifiant et de la fumée de silice. Contrairement au BAP5 qui, par surdosage en fines a perdu sa fluidité, sa grande stabilité le rendant plus visqueux et limite sa capacité au remplissage (performances en milieu confiné). Ces résultats ont été constatés par l'essai de la boîte en L.

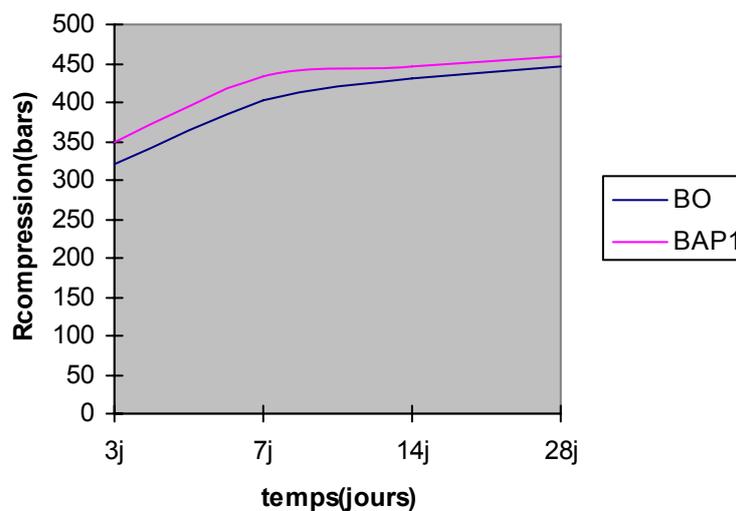
### VII.3.2 Propriétés mécaniques :

Pour l'interprétation des résultats des essais mécaniques on s'est basé sur les performances mécaniques à la compression (en plus de la porosité), les résistances à la traction ont été mesurées à titre indicatif.

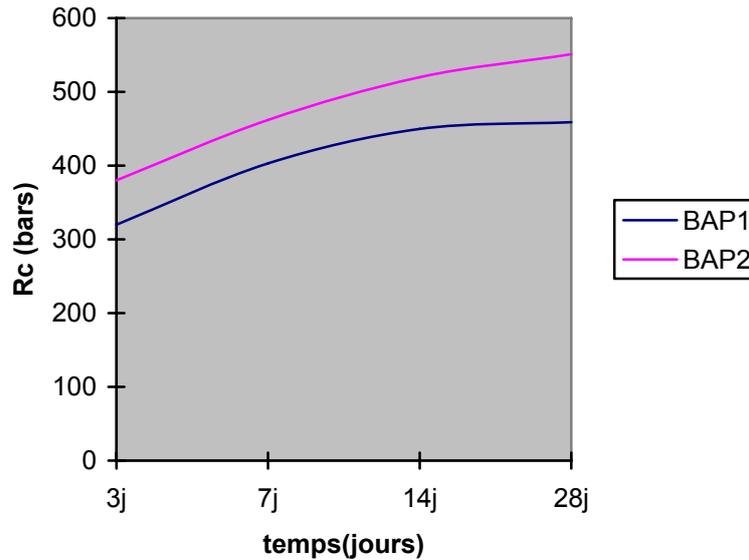
#### VII.3.2.1 Effet du superplastifiant :

La mesure de la porosité à 28 jours des bétons BAP1 et 2 a montré que l'ajout d'un superplastifiant à un dosage de 1,6%C, diminue la porosité du béton de 3,5%. Cette diminution est expliquée par la diminution du rapport E/C (quantité d'eau présente dans le mélange). Bien entendu ces performances sont d'autant meilleures que le dosage en adjuvant est grand (jusqu'à une certaine limite).

Les essais d'écrasement effectués ont montré que le béton autoplaçant a une meilleure résistance que le béton ordinaire (figureVII.7). Celle-ci augmente légèrement avec le dosage du superplastifiant (figureVII.8) du fait que la présence de ce type d'adjuvant diminue la quantité d'eau de gâchage et la porosité, et donc augmente la compacité du béton.



**Figure VII.7 :** résistances à la compression d'un béton ordinaire et d'un BAP.



**Figure VII.8** : résistances à la compression de deux BAP à différents dosages en SP.

Ce qui est à noter c'est que les bétons élaborés (même le béton ordinaire) présentent de bonnes performances mécaniques au jeune âge. Cette résistance élevée peut se justifier par la composition minéralogique du ciment, ce dernier contenant un pourcentage important en silicate tricalcique  $C_3S$ . Ce constituant anhydre donne naissance en présence d'eau à des silicates pratiquement insolubles, le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps explique l'augmentation des résistances mécaniques.

### VII.3.2.2 Effet de la variation de la quantité d'eau :

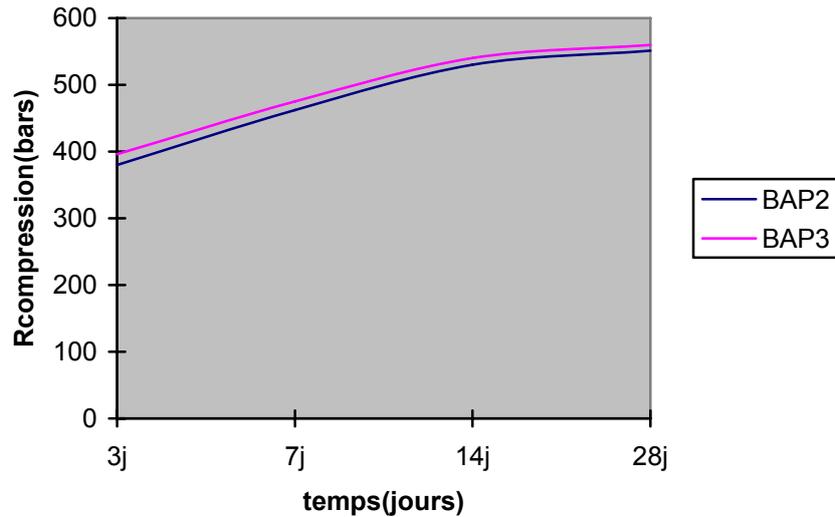
A l'état frais du béton on note une fluidité et une stabilité constantes pour les BAP2 et BAP3, ceci est normal puisque la quantité d'eau réduite est faible et insuffisante pour pouvoir influencer sur les propriétés du béton.

Cependant, l'influence de la diminution de la quantité d'eau de gâchage est surtout marquée pour le comportement du béton à l'état durci.

Ce résultat était prévisible car 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.

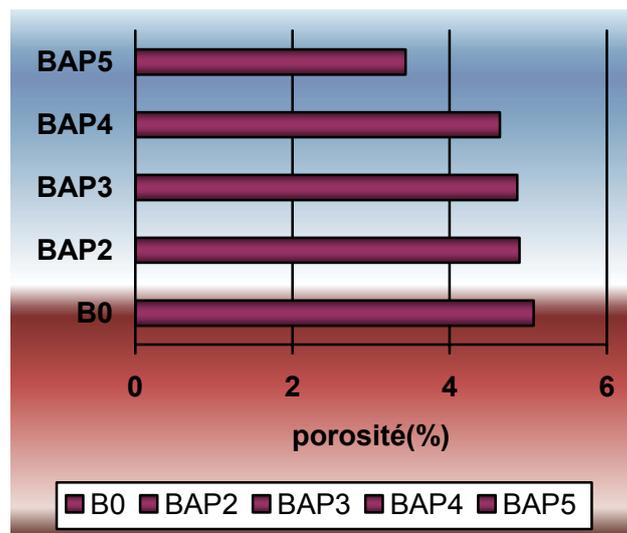
Dans notre cas pour une diminution de la quantité d'eau de 3,5% (quantité réduite faible) on note une diminution de la porosité de 0,6% et un accroissement de la résistance à 28 jours de 1,6% (figure VII.9) (par rapport au BAP2).



**Figure VII.9:** influence du dosage en eau sur la résistance à la compression des BAP.

### VII.3.2.3 Effet de la fumée de silice :

La fumée de silice étant une poudre extra fine, en l'ajoutant au béton, elle joue le rôle d'un correcteur granulométrique, elle comble les vides existant dans le matériau, augmente la compacité, et diminue la porosité totale. On peut confirmer toutes ces affirmations en comparant les BAP4 (5%FS) et BAP5 (10%FS) au BAP2 (sans FS) (figureVII.10).



**Figure VII.10 :** porosité (à 28 jours) des différents bétons élaborés

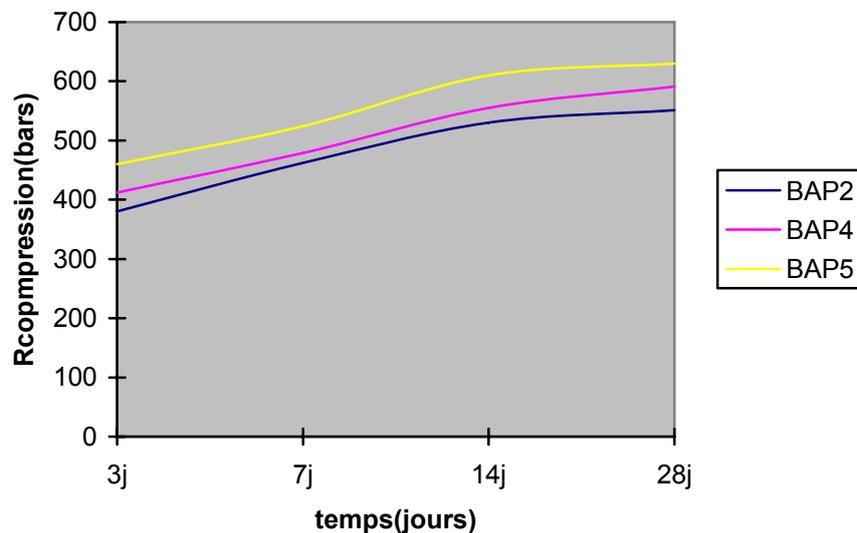
Le béton contenant un adjuvant a une porosité de 4,89% alors qu'un béton contenant le même dosage en adjuvant et 10% de fumée de silice a une porosité de 3,44%, soit une diminution de 29,65%. Pour le BAP 4 la porosité est de 4,62% légèrement inférieur à celle du BAP2.

La diminution de la porosité implique une augmentation considérable de la résistance mécanique (figureVII.11)

La BAP4 contenant un pourcentage petit en fumée de silice (5%) a amélioré la résistance mécanique à 28 jours de 32,51% par rapport au béton témoin (BO) et de 28,75% par rapport à un BAP sans fumées de silice (BAP2).

Le BAP5 quant à lui, contenant 10% de fumées de silice, a atteint une résistance de 630bars à 28jours, soit une amélioration de la résistance de 41,25% par rapport au BO, et 37,25% par rapport au BAP2.

Ces deux bétons ont marqués une augmentation de la résistance dès le jeune âge. Par rapport au BO, le BAP4 a amélioré sa résistance à 3jours de 28,75% et le BAP5 de 43,75 %.



**Figure VII.11** : influence de la présence et du dosage de la fumée de silice sur la résistance à la compression

Néanmoins ces résultats ne sont pas étonnants, la fumée de silice étant plus qu'un correcteur granulométrique qui réduit la taille des pores capillaires, elle contribue dans la cinétique du processus d'hydratation du ciment. Sa réaction pouzzolanique avec la chaux dégagée par le clinker lui permet de créer les ponts de C-S-H (silicate de calcium hydraté) accélérant ainsi le processus d'hydratation.

**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 vibrés. Mais leur comportement est influencé par différents paramètres. Dans cette étude on a vu l'effet de:

- \* Dosage en superplastifiant.
- \* La quantité d'eau de gâchage.
- \* La présence des fumées de silice.
- \* Le dosage en fumées de silice.

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'ajout du superplastifiant permet d'améliorer la fluidité des BAP en diminuant en rapport E/C, ce qui limite la porosité du béton et améliore sa résistance mécanique. Une diminution (limitée) de la quantité d'eau de gâchage aura les mêmes conséquences
- ◆ L'incorporation de la fumée de silice dans la composition d'un BAP améliore la fluidité et la stabilité (évite le ressuage et la ségrégation), son action varie selon son dosage faible ou élevé. Le dosage élevé en FS nécessite l'utilisation d'un superplastifiant pour maintenir la fluidité et l'ouvrabilité. Agissant comme un correcteur granulométrique, la fumée de silice diminue la porosité du béton et augmente donc sa résistance.

## CONCLUSION GENERALE :

Les bétons autoplaçant sont des bétons spéciaux dont les qualités méritent d'être valorisées. En raison de leurs propriétés rhéologiques très spécifiques, leur compréhension nécessite des investigations plus approfondies.

Dans ce travail, nous avons considéré une partie infime des paramètres influents sur leur comportement. Des études ultérieures ont été faites prenant en compte : D'autres méthodes de formulations, l'influence des ajouts (minéraux et chimique) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques, la variation du type des constituants et encore plus de paramètres, mais aussi la mesure de la viscosité. Celle-ci nécessitait un matériel qui n'est pas disponible (rhéomètre en particulier). Des observations intéressantes nous ont ainsi manqué.

Ce qui rend cette étude plus ardue est, d'une part, le manque de matériel sophistiqué pour la réalisation des essais. Et d'autre part le manque de temps nécessaire pour l'observation de différents phénomènes à long terme comme le retrait et la fissuration.

Des études complémentaires plus approfondies doivent être engagées en de nombreuses zones d'ombre subsistantes dans la connaissance du comportement des BAP, notamment :

- ⇒ Le phénomène de retrait qui est, d'après quelques recherches, plus important que celui des bétons ordinaires.
- ⇒ La résistance des BAP au jeune âge, qui est un paramètre important vu les quantités bétonnées actuellement.
- ⇒ Le comportement des BAP aux différents traitements de surfaces.
- ⇒ La résistance au feu.
- ⇒ La pompabilité des BAP.
- ⇒ Résistances à l'usure et aux chocs.
- ⇒ L'influence des traitements thermiques sur les caractéristiques et propriétés des BAP.

Certains de ces thèmes sont étudiés dans le Projet National sur les bétons autoplaçants. Les objectifs du projet national sont de mener des recherches finalisées sur :

- ⇒ L'élaboration et la caractérisation des BAP
- ⇒ Leur mise en œuvre
- ⇒ Les besoins en matière de spécification et de prescription.

# **ANNEXES**

## **ANNEXE I : Mode opératoire des essais concernant les bétons autoplaçants (à l'état frais).**

### **1 - Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump Flow)**

#### **Objet de l'essai :**

Caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné.

#### **Matériel nécessaire :**

- \* Plateau équipé d'une plaque métallique plane de forme carrée d'au moins 90cm de côté.
- \* Cône d'Abrams, celui-ci dispose d'un empattement pour être maintenu contre le plateau avec les pieds de l'opérateur.
- \* Mètre de 90cm

#### **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, mesurer (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 terme de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.

### **2 - Essai de stabilité au tamis**

#### **Objet de l'essai :**

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

#### **Matériel nécessaire :**

- \* Seau de 10 litres + couvercle

- \* Tamis 5mm diamètre 315mm + fond de tamis
- \* Balance : précision minimale 20g, portée minimale 20kg.

### **Mode opératoire :**

- \* Echantillonnage : malaxer, verser directement 10litres de béton dans le seau. Le temps d'attente entre l'arrêt du malaxeur et le prélèvement < 30 secondes.
- \* Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation.
- \* Attendre 15 minutes.
- \* Peser le fond.
- \* Poser le tamis +fond sur la bascule.
- \* Verser au centre du tamis un poids de béton égal à 4,8 kg ± 0,2 kg, hauteur de chute du béton 50 cm ± 5 cm.
- \* Attendre 2 minutes.
- \* Faire la tare
- \* Peser le poids de laitance :  $P_{\text{laitance}} = P_{\text{fond +laitance}} - P_{\text{fond}}$
- \* Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$\text{Stabilité (\%)} = (P_{\text{laitance}} \times 100) / P_{\text{échantillon}}$$

### **3 - Essai de le boite en L (Capacité de remplissage)**

#### **Objet de l'essai :**

Tester la mobilité du béton en milieu confiné et vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes du phénomène de blocage inacceptables.

#### **Matériel nécessaire :**

La boite en L

#### **Mode opératoire :**

- \* Vérifier que la boite est sur un plan horizontal.
- \* Remplir de béton la partie verticale de la boite en L (Son volume est d'environ 13litres).
- \* Araser et laisser le béton reposer pendant 1minute.
- \* Enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boite à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39mm.
- \* Quand le béton ne s'écoule plus, on mesurer les hauteurs H1 et H2. On exprime le rapport H2/H1.

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

**ANNEXE II : Coefficients A et K  
(Formulation par la méthode de Faury).**

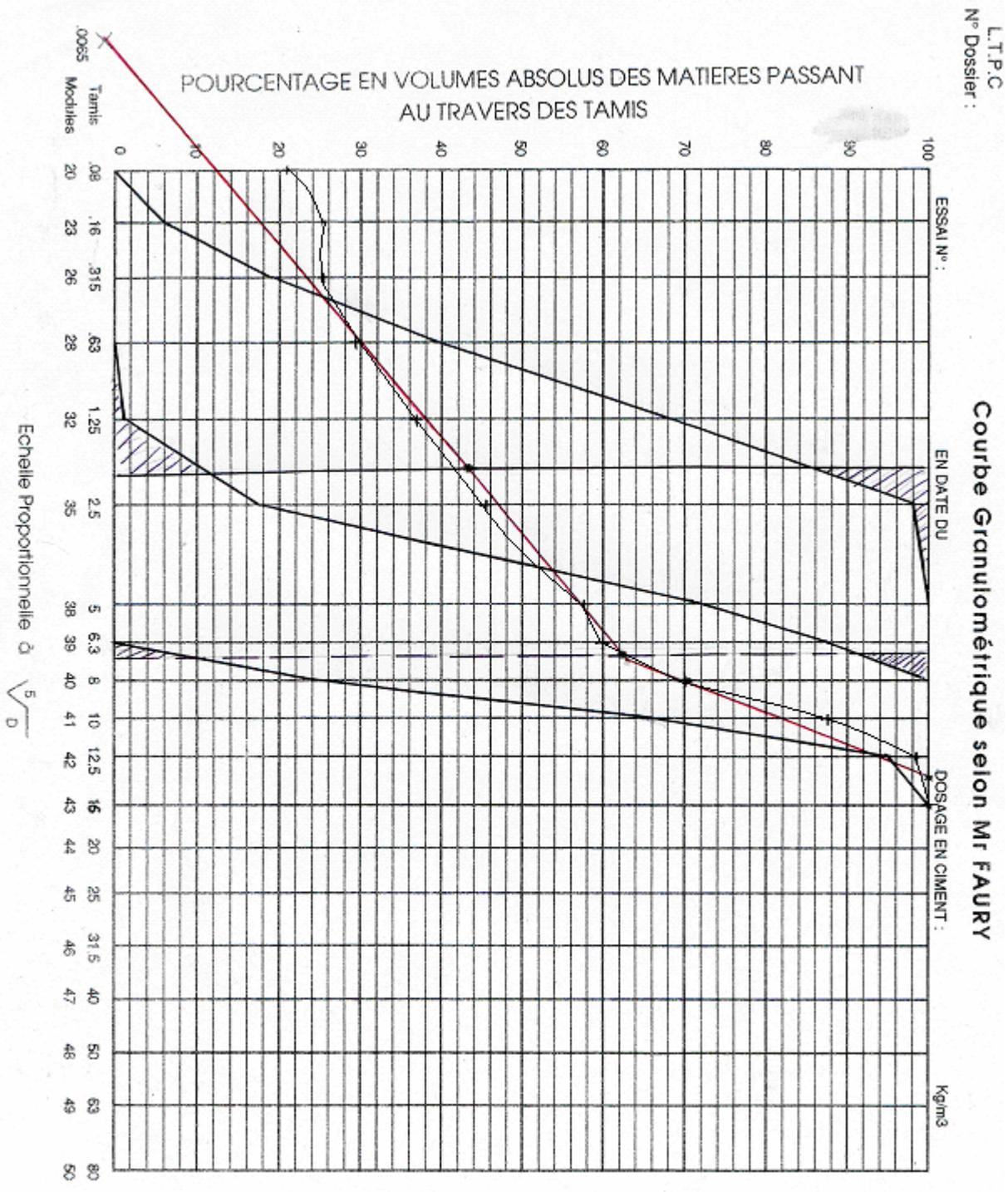
**Tableau 1 : valeurs du coefficient A**

<b>Béton</b>	<b>S roulé/G roulé</b>	<b>S roulé/G concassé</b>	<b>S concassé/G concassé</b>
<b>Très fluide</b>	32	34	38
<b>Fluide</b>	30-32	32-34	36-38
<b>Mou</b>	28-30	30-32	34-36
<b>Ferme</b>	26-28	28-30	32-34
<b>Très ferme</b>	24-26	26-28	30-32
<b>puissant</b>	22-24	24-26	28-30

**Tableau 2 : valeur du coefficient K**

<b>Béton</b>	<b>S roulé/G roulé</b>	<b>S roulé/G concassé</b>	<b>S concassé/G concassé</b>
<b>Très fluide</b>	0,370	0,405	0,450
<b>Molle</b>	0,35-0,37	0,375-0,405	0,430-0,460
<b>Ferme</b>	0,33-0,35	0,355-0,385	0,400-0,430
<b>Très ferme</b>	0,25-0,33	0,330-0,350	0,350-0,370
<b>Extra sèche</b>	0,25	0,330	0,350

**ANNEXE III : Courbes granulométriques  
Formulation du béton ordinaire  
(Courbe de référence + Courbe du mélange)**



## Références Bibliographique

- [1] BATIMAG, *revue spécial huitième salon BATIMATEC*, Mai 2005.
- [2] PH.TURCRY et A.LOUKILI, *Différentes approches pour la formulation des BAP*, revue française de génie civil volume 7 n°4, 2003.
- [3] PH.TURCRY, *Retrait et fissuration des BAP : influence de la formulation*, thèse de doctorat, l'école centrale de Nantes de l'université de Nantes, février 2004.
- [4] HOLCIM, *Le béton autocompactant*, recommandation éditées par HOLCIM, Suisse, novembre 2005.
- [5] T.SEDRAN, *Les bétons autonivelants (BAN) synthèse bibliographique*, Bulletin de liaison LCPC, mars 1995.
- [6] J-C.BRAQUENIER et J.DESNYTER, *le béton autoplaçant ou autocompactant*, 2000.
- [7] CSTC (centre de recherche), *Béton et ouvrages en béton, rapport d'activités*, Belgique, 2004.
- [8] P.ROUGEAU et CH MARRY DIPPE, O.FRANCY, *Les BAP : synthèse des connaissances et campagne expérimentale*, CERIB, février 2001.
- [9] Z. ABIB, *Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants*, thèse de magister USTHB, 2004.
- [10] J.BARON et J-P.OLLIVIER, *Les bétons : bases et données pour leur formulation*, Eyrolles, 1999.
- [11] A. Tagnit Hamou, *Les ajouts cimentaires et le développement durable*, Université de Sherbrooke, Québec, CANADA.
- [12] Mladenka Saric-Coric, *Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons*, Université de Sherbrooke, 2002.
- [13] H. KHAYAT, *Optimisation et caractérisation des bétons autoplaçants pour coffrages fortement armés*, Université de Sherbrooke, Québec, CANADA.
- [14] Z. ABIB, *Bétons autoplaçants : performances rhéologiques et mécaniques*, CTC centre, Avril 2005.
- [15] G.DREUX, *Nouveau guide du béton*, Eyrolles, 1979.

- [16] HADID, *Béton, constituants, composition et essais sur béton*, LCPC, février 2005.
- [17] ERCE – CTC EST- GRANITEX, *Les adjuvants : définitions et opportunités d'utilisation*, journée d'information (ciment, béton, adjuvants), 2004.
- [18] S.FLAMANT, *Effet de la substitution partielle du ciment par des filler calcaire dans le mortier*, projet de fin d'étude, Université de Liège (Belgique), 2003-2004.
- [19] PC. AÏTCIN – S.JIANG – B.KIM – PC.NKINAMUBANZI - N. PÉTROV, *L'interaction ciment/superplastifiant : Cas des polysulfonates*, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 233, page : 87-98, Juillet - Août 2001.
- [20] A.DAOUD, *Etude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton autoplaçant contribution a la modélisation numérique de l'interface*, thèse de doctorat, INSA Toulouse, juin2003.
- [21] Ir C .LADANG, *Béton autocompactant : formulation au départ des paramètres de base*.
- [22] M.MOURET et F.KHARCHI, *Effet de la taille des granulats sur le comportement rhéologique des bétons (Application aux BAP)*, Algérie équipement, mai2005.
- [23] CIMBETON, *Le béton : les techniques de mise en place du béton évoluent*, CSTB magazine, N°109 Novembre 1997.
- [24] JF. BERTIN, *recommandations de mise en œuvre des bétons autoplaçants et des autonivelants*, Fédération Française du Bâtiment, SEBTP (Paris), 2003.
- [25] N.KEDJOUR, *Le laboratoire du béton*, OPU, mars2003.
- [26] Société CONTROLS, *Catalogue : appareils et matériels d'essais pour le bâtiment et les travaux publics*, 2005.
- [27] M.DURIEZ, *Traité de matériaux de construction (tome1)*, Dunod.
- [28] Société BERA TEST, *Catalogue laboratoire : instruments de contrôle pour Génie Civil*, Suisse, 2005.
- [29] GRANITEX, *Fiche technique de MEDAFLOW 30*.
- [30] GRANITEX, *Fiche technique de MEDAPLAST HP*.

