

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA-BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
Département de Génie Civil

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master 2en Génie Civil

Option : Matériaux et Structures

Thème

**Etude à la compression d'un Béton
autoplaçant avec additions minérales
(Argile cuite et broyée et Fillers calcaires)**

Présenté par :

M^{elle} : Benaddad Sabrina

M^{elle} : Benatsou Nacira

Encadré par :

M^{me} : Souidi.Fatiha Maitre assistante A

Devant le jury

M^r : MEHIDI KHALED

Maître assistant A

M^{elle} : MEZIANI MERIEM

Maître assistante B

Promotion 2012

Remerciement

De prime abord, on tient à remercier le dieu et miséricordieux de nous avoir donnés la force, le courage et la patience durant notre étude pour arriver à ce jour-là.

Comme, c'est un plaisir de remercier tous ce qui a contribué à la réalisation de ce mémoire :

En premier lieu, nous voudrions exprimer nos sincères remerciements à Madame souidi.F. Notre promotrice, pour l'aide qu'elle a apportée à la réalisation de ce travail et pour ses précieux conseils

Nous vifs remerciements vont aux membres du jury M^r : MEHIDI et M^{elle} : MEZIANI qui nous ferons l'honneur de traiter notre travail.

Benaddad Sabrina & Benatsou Nacira.....

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents

***A mes frères Mouhcin, Krimou, Aziez, Abed Salam, Azzedine et ma
sœur Fatiha et sa familles***

A mes oncles et mes tantes

A mes cousins et cousines

***A mes copines de chambre Baya, Djida, Sonia, Farida, Souad, Aicha,
Sabiha et à tout mes amis***

A Ali et Hakima et leur fils

Nacira

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents,

A mes chers frères et sœurs,

A ma cher grande famille,

A tous mes amis proches ou loin,

à tous ceux qui sont chers, et trouvent leurs place dans mon cœur

Sabrina

Résumé

Les bétons autoplaçants (BAP) constituent une nouvelle génération de béton, ce sont des bétons très fluides, se mettant en place sans vibration. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de superplastifiant et l'ajout d'une addition minérale qui avec l'eau et le ciment constituent une suspension colloïdale de viscosité nécessaire, dans laquelle nagent les granulats plus grossiers sans aucune tendance à la ségrégation.

Différentes formulations sont étudiées permettant d'évaluer les propriétés d'un béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci avec divers taux d'ajout d'argile cuite et broyée (ACB).

L'objet principal de cette étude est de créer un BAP économique et avec un taux d'impact sur l'environnement réduit, en utilisant un BAP avec optimisation d'une addition minérale qui est l'argile cuite et broyée (ACB) prise à différentes proportions permettant de communiquer au mélange les caractéristiques d'un béton autoplaçant.

Les résultats obtenus montrent un effet favorable de l'argile cuite et broyée sur la résistance à la compression des BAP à 28 jours à un taux d'ajout de 5%.

Mots clés : Béton autoplaçant (BAP), argile cuite et broyée, superplastifiant, ségrégation, résistance à la compression.

Summary

Self compacting concretes (SCC) are a new generation of concrete, are very fluid concrete, putting in place without vibration. This property can be obtained by the use of superplasticizer and adding an addition with water and cement are a colloidal suspension of necessary viscosity, which swim more coarse aggregate without any tendency to segregation.

Different formulations are investigated to assess the properties of concrete self-compacting State fees and State cured with various rate of addition of cooked and crushed clay.

The advantage of this study is to create an economic SCC and with a rate of reduced environmental impact, using a SCC with optimization of mineral addition which is cooked and crushed clay of different proportions to communicate to the mixture self-compacting concrete characteristics.

The results obtained show a favourable effect of the clay cooked and crushed on the compressive strength of the SCC to 28 days at a rate of addition of 5%.

Keyword (s): Self compacting Concrete (SCC, cooked and crushed clay, superplasticizer, segregation, compressive strength.

Liste des tableaux

| | |
|---|-----------|
| Tableau 1 : Classification des BAP selon leur application | 1 |
| Tableau 2 : Les propriétés des BAP à l'état frais | 13 |
| Tableau 3 : Les composantes du CPA | 18 |
| Tableau 4 : Les différents types du ciment | 19 |
| Tableau 5 : Rôles des principaux paramètres dans la caractérisation et la formulation des BAP | 26 |
| Tableau 6 : Analyse granulométrique du sable 0/3 | 43 |
| Tableau 7 : Analyse granulométrique du gravier 3/8 | 43 |
| Tableau 8 : Analyse granulométrique du gravier 8/15 | 44 |
| Tableau 9: Essai de Los Angeles des graviers étudié | 46 |
| Tableau 10: Masses volumiques apparentes des granulats | 47 |
| Tableau 11: Les masses volumiques absolues des granulats | 48 |
| Tableau 12: Résultats de l'essai d'équivalent de sable | 50 |
| Tableau 13: début et fin de prise des différentes pâtes de ciment | 51 |
| Tableau 17: La composition chimique des ajouts utilisée | 52 |
| Tableau 18 : L'analyse sédimentométrique des fines | 54 |
| Tableau 19: Composantes du béton autoplaçant (dosage pour 1m ³ du béton) | 56 |
| Tableau 20: La composition de BAP Sans ACB (0%) | 57 |
| Tableau 21: Récapitulatif de la composition des gâchées préparées | 57 |
| Tableau 22 : Récapitulation des essais sur le béton frais | 60 |
| Tableau 23 : Teneurs en air des BAP | 61 |
| Tableau 24: Les masses volumiques moyennes fraîches | 61 |
| Tableau 25: Les masses volumiques moyennes des bétons durcis | 62 |
| Tableau 26: Résistance à la compression des différents bétons | 63 |

Liste des Figures

| | |
|--|-----------|
| Figure 1 : Mise en place sous son poids propre | 3 |
| Figure 2 : les granulats nagent à la surface sans aucune ségrégation | 4 |
| Figure 3 : Composition d'un BO et d'un BAP ; Aspect à l'état frais d'un BO et BAP | 5 |
| Figure 4 : Quelques exemples d'utilisation d'un BAP | 7 |
| Figure 5 : dispersion des granulats par excès de pâte | 9 |
| Figure 6 : Relation entre l'étalement et la quantité de pâte d'un béton. | 10 |
| Figure 7 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle d'après | 11 |
| Figure 8 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides | 11 |
| Figure 9 : les Granulats utilisé dans le béton | 14 |
| Figure 10 : les types granulats selon leurs formes | 15 |
| Figure 11 : Ciment | 17 |
| Figure 12 : L'eau | 19 |
| Figure 13 : Défloculation des grains de ciment par le superplastifiant | 20 |
| Figure14 : Les mécanismes de transport des BAP | 27 |
| Figure 15 : Les différents coffrages utiliser pour les BAP | 28 |
| Figure 16 : Mise en place aisée du BAP par un seul ouvrier | 29 |
| Figure 17 : Essai d'étalement d'un BAP | 35 |
| Figure 18 : boîte en L | 36 |
| Figure 19 : Essai au tamis | 37 |
| Figure 20 : Essai de l'entonnoir | 38 |
| Figure 21 : Essai d'étalement modifier | 38 |
| Figure 22 : Essai du caisson | 39 |
| Figure 23 : Les Fillers calcaires | 40 |
| Figure 24 : L'Argile cuite te broyée | 41 |
| Figure 25 : La colonne des tamis | 42 |

| | |
|---|-----------|
| Figure 26 : La courbe d'analyse granulométrique | 44 |
| Figure 27 : l'appareil de Los Angeles | 45 |
| Figure 28 : Détermination des masses volumiques des granulats | 48 |
| Figure 29 : Essai d'équivalent de sable | 50 |
| Figure 30 : essai de début et de fin de prise | 52 |
| Figure 31 : Courbe d'analyse sédimentométrique | 54 |
| Figure 32 : L'ensemble des essais effectués sur le béton frais | 60 |
| Figure 33 : Essai de compression | 63 |
| Figure 34 : Influence de dosage en superplastifiant sur la consistance | 64 |
| Figure 35 : La ségrégation dynamique des bétons (Boite en L) | 65 |
| Figure 36 : Résistance à la ségrégation statique en fonction de taux d'ajout d'ACB | 66 |
| Figure 37 : vérification de la ségrégation | 67 |
| Figure 38 : Evolution des masses volumiques des BAP en fonction du temps | 67 |
| Figure 49 : Influence du superplastifiant sur la résistance à la compression | 68 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction général | 1 |
| Partie théorique : Analyse Bibliographique | |
| Chapitre I : Béton autoplaçant : Composantes et caractéristiques | |
| I.1 Introduction | 3 |
| I.2 Définition du BAP | 3 |
| I.3 Historique des BAP | 5 |
| I.4 Domaines d'utilisation des BAP | 7 |
| I.5 Les Avantages et inconvénients des BAP | 8 |
| I.6 La Spécificité de la composition des BAP | 9 |
| I.6. 1 Un volume de pâte élevée | 9 |
| I.6. 2 Une quantité de fines élevée | 10 |
| I.6. 3 L'utilisation de superplastifiants | 11 |
| I.6. 4 Un faible volume de gravillons | 11 |
| I.6. 5 Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau dit agent de viscosité | 11 |
| I.7 propriétés des BAP à l'état frais | 12 |
| I.7.1 La résistance à la ségrégation | 12 |
| I.7.2 La capacité de remplissage (fluidité) | 13 |
| I.8 propriétés des BAP à L'état durci | 14 |
| I.8.1 Résistance mécanique | 14 |
| I.9 Les constituants des BAP | 14 |
| I.9.1 Granulats | 15 |
| I.9.2 Ciment | 16 |
| I.9.2.1 Les principaux constituants du ciment portland | 17 |
| I.9.2.2 Les différents types du ciment | 18 |
| I.9.3 L'eau de gâchage | 20 |
| I.9.4 L'emploi de superplastifiant | 20 |
| I.9.4-1 Mode d'action des superplastifiants | 20 |
| I.9.5 L'agent de viscosité | 22 |
| I.9.6 Les additions minérales | 22 |
| I.9.6-1 Classification des additions | 23 |
| I.10 Fabrication, transport et mise en place des BAP | 26 |
| I.10-1 Fabrication | 27 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| I.10-2 Transport | 27 |
| I.10-3 coffrage | 28 |
| I.10-4 Mise en place | 29 |
| Chapitre II: Essais et méthodes de formulations des bétons autoplaçants | |
| II.1 Introduction | 31 |
| II.2 Formulation des BAP | 31 |
| II.2.1 Approche japonaise | 31 |
| II.2.2 L'approche suédoise | 31 |
| II.2.3 Formulation par volume de pâte minimal | 32 |
| II.2.4 Formulation par optimisation du squelette granulaire | 32 |
| II.2.5 Méthode basée sur un plan d'expérience | 32 |
| II.3 Caractérisation des BAP | 33 |
| II.3.1 Essai d'étalement | 33 |
| II.3.1-1 But | 33 |
| II.3.1-2 Appareillage | 33 |
| II.3.1-3 Mode opératoire | 34 |
| II.3.2 Essai de la boîte en L | 35 |
| II.3.3 Essai de stabilité des tamis | 36 |
| II.3.3-1 But | 36 |
| II.3.3-2 Appareillage | 36 |
| II.3.3-3 Mode opératoire | 36 |
| II.3.4 Essai d'entonnoir (V-Funnel) et d'étalement modifié (J-Ring) | 37 |
| II.3.5 Essai du caisson | 39 |
| II.4 Conclusion | 39 |
| Partie pratique | |
| Partie I : Procédure expérimentale | |
| I.1 Les matériaux utilisés | 40 |
| I.1-1-1 Les Granulats | 40 |
| I.1-1-2 Le Ciment | 40 |
| I.1-1-3 Les additions | 40 |
| I.1-1-4 L'Adjuvant | 41 |
| I.1-1-5 L'eau de gâchage | 41 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| I.2 Identification des matériaux | 42 |
| I.2-1 Les Granulats | 42 |
| I.2.1-1 Echantillonnage | 42 |
| I.2.1-2 Analyse granulométrique | 42 |
| I.2.1-3 Résistance au choc | 45 |
| I.2.1-4 Détermination des masses volumiques des granulats | 46 |
| I.2.1-4-1 Détermination de masse volumique apparente | 46 |
| I.2.1-4-2 Masse volumique absolue | 46 |
| I.2.1-5 Essai d'équivalent de sable | 48 |
| I.2-2 Les fines | 50 |
| I.2.2-1 Essai de prise | 50 |
| I.2.2-3 Les additions | 52 |
| I.2.2-4 L'analyse sédimentométrique des fines | 53 |
| Partie II : Formulation et essais de caractérisations | |
| II.1 Introduction | 55 |
| II.2 Formulation de BAP | 55 |
| II.2.1 Formulation de BAP sans addition d'ACB (0%) | 56 |
| II.2.2 Formulation avec addition en ACB | 57 |
| II.2.3 Préparation des gâchées | 58 |
| II.2.4 Conservation des éprouvettes | 59 |
| II.3 Essais sur BAP | 59 |
| II.3.1 Essais sur béton frais | 59 |
| II.3.1.1 Essais de consistance | 59 |
| II.3.1.2 Essai de ségrégation dynamique | 59 |
| II.3.1.3 Essai ségrégation statique | 59 |
| II.3.1.4 La teneur en aire | 61 |
| II.3.2 Essais sur le béton durci | 62 |
| II.3.2-1 Masse volumique durcie des bétons | 62 |
| II.3.2-2 Essai de compression | 62 |
| Partie III : Interprétation et discussion des résultats | |
| III.1 Introduction | 64 |
| III.2 La consistance | 64 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| III.2.1 Effet du superplastifiant | 64 |
| III.2.2 L'effet de dosage en ACB | 64 |
| III.3 La ségrégation dynamique | 65 |
| III.4 La ségrégation statique | 66 |
| III.5 Vérification de la ségrégation | 67 |
| III.6 Les masse volumiques durci | 67 |
| III.6 Résistance à la compression | 68 |
| III.6.1 Influence du superplastifiant | 68 |
| III.6.2 Influence du taux d'ajout de l'ACB | 69 |
| III.7 Conclusion | 69 |
| Conclusion générale | 70 |

Abréviations

BO : Béton ordinaire

BAP : Béton autoplaçant

ACB : Argile cuite et broyée

E : Eau

C : Ciment

G : Gravier

V : volume

P_p : Masse volumique apparente

P_s : Masse volumique absolue

LA : coefficient Los Angeles

ESV : Equivalent de sable visuel

ESP : Equivalent de sable à piston

FC : Fillers calcaires

Sp : Superplastifiant

M_{vf}:Masse volumique fraîche du béton

M_{vd}:Masse volumique durci du béton

f_{c28} : Résistance à la compression à 28 jours

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. De nouveaux bétons sont ainsi apparus tels que les bétons à haute résistance, les bétons autoplaçants et les bétons recyclés.

La vibration a toujours été le moyen d'obtenir une mise en place aisée, un bon remplissage de coffrage. Devant la complexité croissante des structures, formes variées, concentration d'armatures, les formulations de béton ont dû s'adapter, ce qui rend la mise en œuvre des bétons ordinaires très compliquée à ce types d'ouvrages avec des défaillances structurales très probables. Toutefois pour construire des structures durables et rigides il est nécessaire, de développer un béton de qualité afin de répondre aux exigences de la mise en place correcte et satisfaire au critère d'économie en introduisant des matériaux de recyclage.

Afin d'assurer des structures durables et uniformes et éviter les erreurs dues à la mise en place du béton, l'idée de produire les bétons fluides qui s'étalent dans les coffrages sans effort de vibration, c'est ainsi que le concept du béton autoplaçant a vu le jour.

Les bétons sont devenus de plus en plus fluides malgré la réduction de la quantité d'eau de gâchage, à tel point que la vibration n'est plus nécessaire. Cette hyperfluidité du béton a été rendue possible avec l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants "superplastifiants".

L'idée de produire des bétons autoplaçant a été lancée pour la première fois au Japon vers la fin des années 80. Depuis, l'utilisation de cette gamme de béton a été répandue de plus en plus partout dans le monde. En effet d'après son développement, le nombre d'ouvrages réalisés avec les bétons autoplaçants ne cesse d'augmenter surtout au Japon où l'utilisation de ce nouveau matériau est répandue dans le domaine de la construction.

Le béton autoplaçant 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 mémoire comporter deux parties principales :

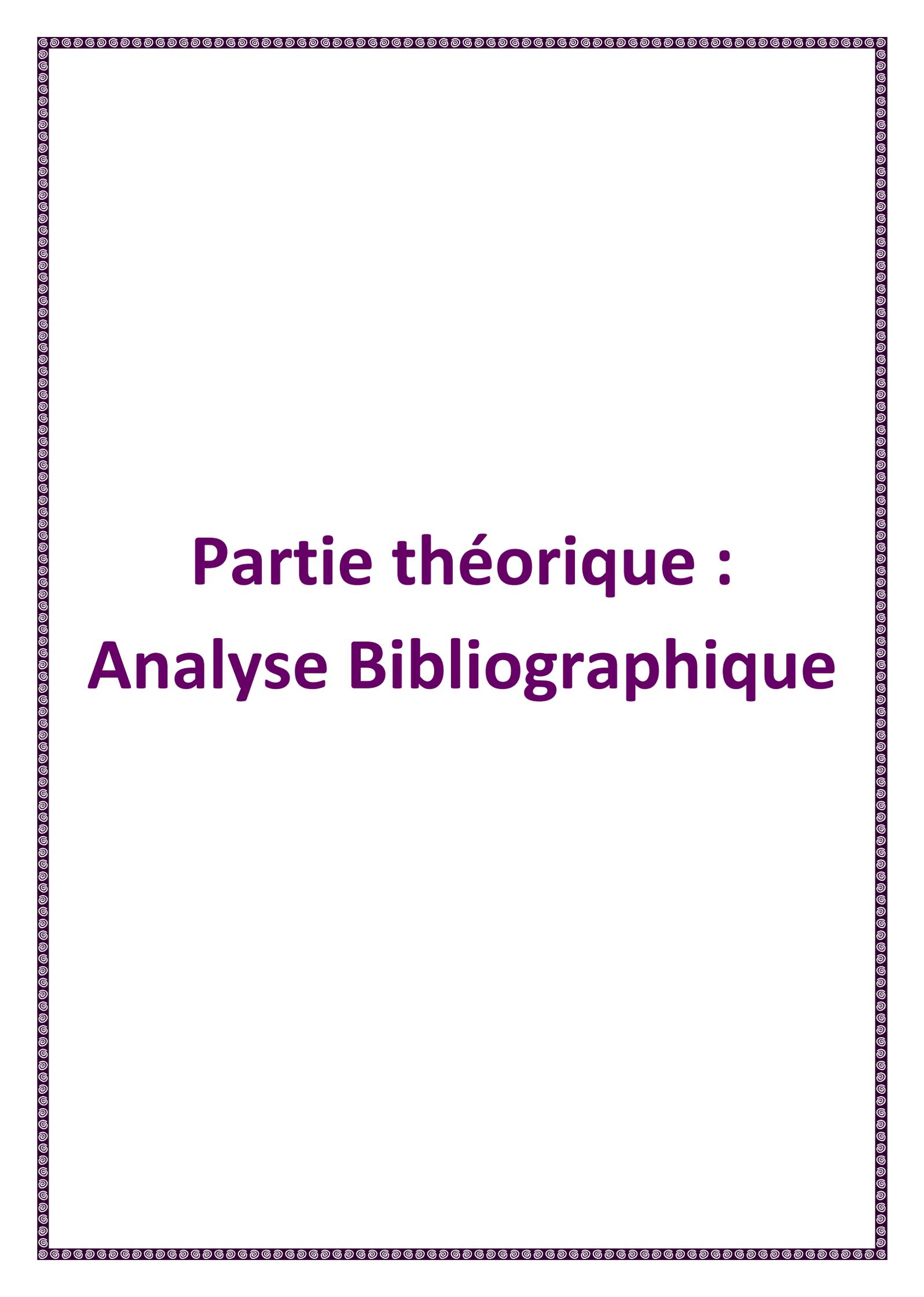
◆ **Une partie théorique**: qui est une synthèse bibliographique de la littérature spécialisée. Elle englobe la définition d'un béton autoplaçant, de ses composants, des propriétés recherchées ainsi que le processus d'élaboration et de transport. Les méthodes de formulation d'un BAP, les essais de caractérisation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

◆ **Une partie expérimentale** : qui présente l'ensemble des essais effectués au Laboratoire de matériaux de construction du département de Génie Civil. La méthode de formulation adoptée à également été présentés.

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

L'objectif de ce travail est d'examiner les effets d'utilisation des additions minérales sur les propriétés fraîche et durci des bétons autoplaçant. Au total quatre(4) mélanges de bétons ont été formulés ayant un rapport eau/fine de 0.45 constant. Le mélange témoin à inclut seulement un ciment CEM II/B 32.5 MPa tandis que les autres, des mélanges cimentaires de ciment et d'argile broyée et cuite (ACB) à des proportions variables (5%,10%,15%).

L'argile broyée et cuite (ACB) est utilisée comme addition minérale vue sa forte pouzzolanicité [6],[11].



Partie théorique :

Analyse Bibliographique

I.1 Introduction

Les BAP ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était d'augmenter les cadences de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre de bétons.

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

I.2 Définition du BAP

Le béton autoplaçant est défini comme suit dans l'Annexe nationale NA de la norme SN EN 206-1 : Le béton frais est appelé autoplaçant lorsqu'il se compacte suffisamment grâce à son poids propre tout en ne présentant pas de ségrégation.

Ce sont des bétons très fluides, la caractéristique principale de ces bétons réside dans le fait qu'ils se mettent en place sans vibration. Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes. Grâce à leurs bonne uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures résistantes et durables [27].

La figure (1) montre une comparaison entre la mise en place d'un béton traditionnel et d'un BAP.

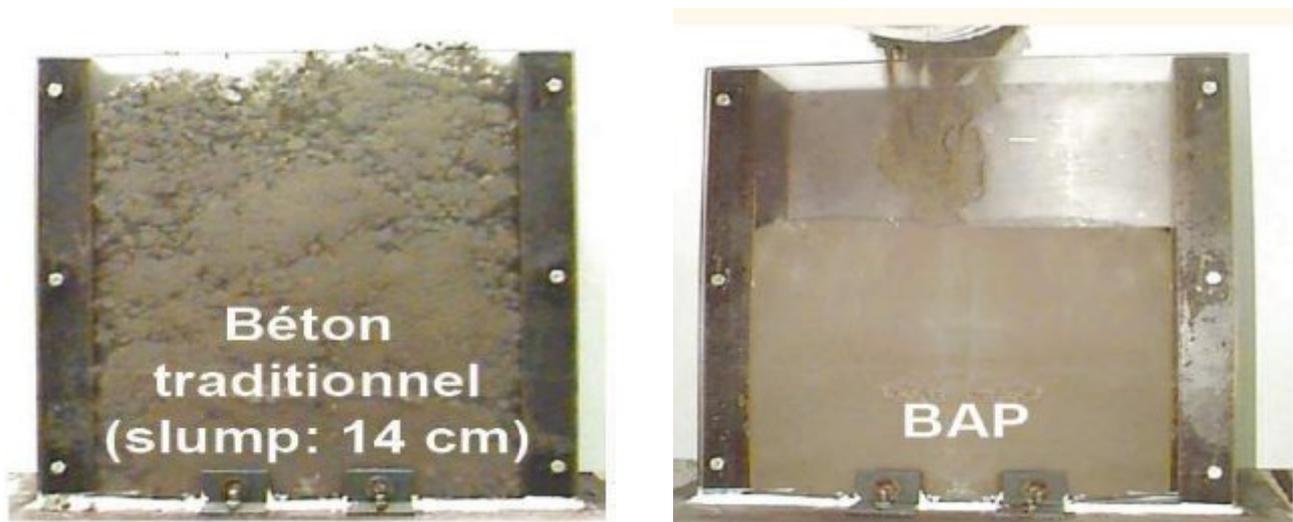


Figure1 : Mise en place sous son poids propre [35]

Ces propriétés peuvent être obtenues par l'emploi de superplastifiant et un volume de fines convenables.

Les BAP se distinguent donc des bétons ordinaires, ou bétons à vibrer, par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment+sables+eau+adjuvant+fines) plus élevée que les bétons ordinaires, ils se

caractérisent aussi par une quantité de fines élevée et l'emploi de superplastifiant. Une nouvelle famille d'adjuvants, appelés rétenteurs d'eau ou agents de viscosité, entre également parfois dans leurs formulations. Ces derniers vont donner de la viscosité à la pâte, pour lui conférer un certain nombre de propriétés qui visent à limiter la résistance à la ségrégation (figure 2) [22].



Figure 2 : les granulats nagent à la surface sans aucune ségrégation.[24]

Ce sont ses propriétés à l'état frais qui distinguent essentiellement les BAP des BO.

Les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leurs cas, la pâte définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition (ciment+eau efficace +air occlus+addition), est privilégié au détriment des gravillons (voir la figure 3) En générale, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent de la méthode de formulation choisie [30].

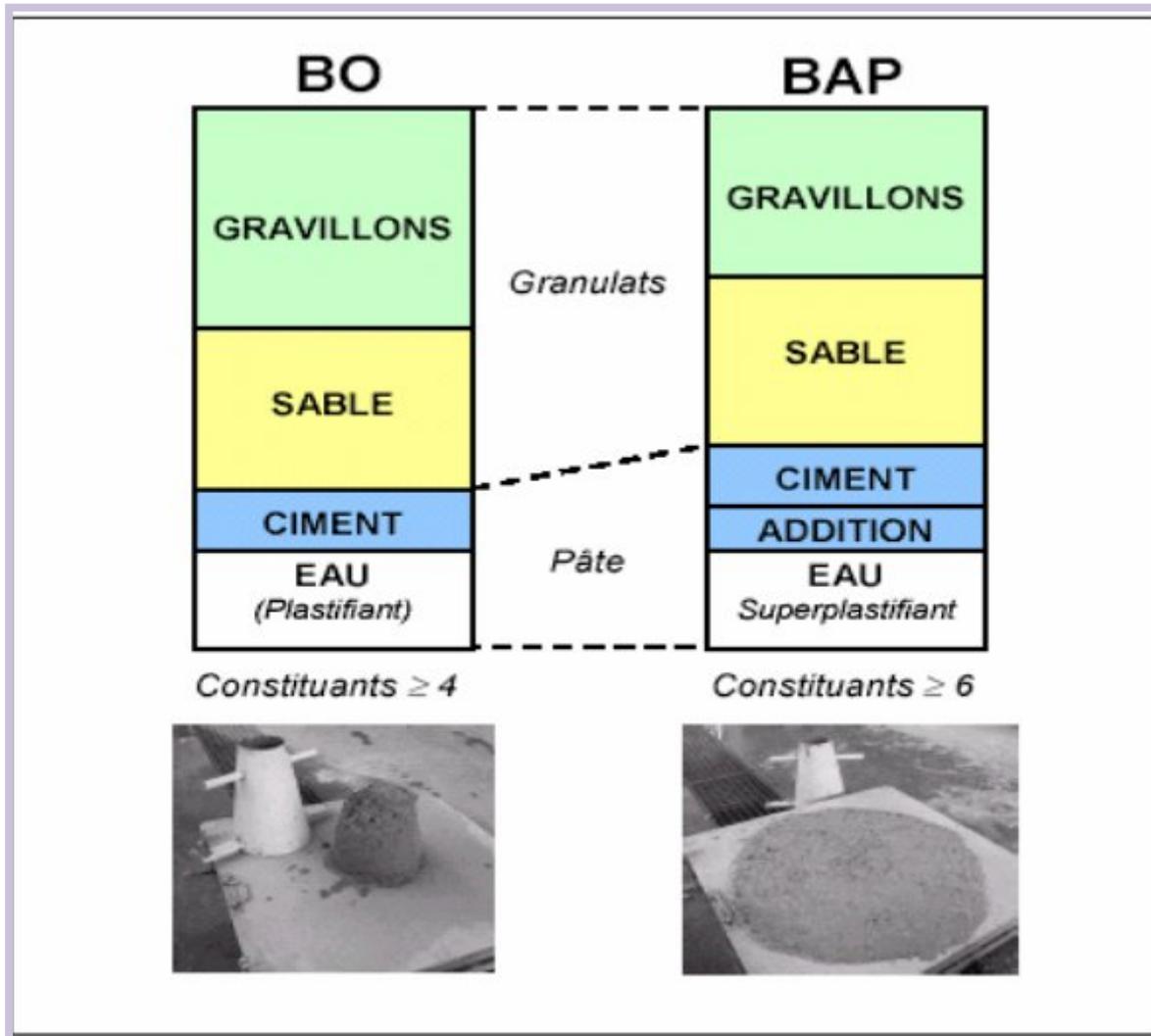


Figure 3 : Composition d'un BO et d'un BAP, Aspect à l'état frais d'un BO et BAP. [30]

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 [1].

I.3 Historique des BAP

Le béton occupe, depuis son invention, la première place en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Son invention remonte en 1848 où Joseph Louis LAMBOT construisit une barque (en « Fil de Fer » recouvert de ciment) baptisée le « bateau ciment » et puis l'invention du « ciment armé » par un jardinier nommé Joseph MONIER entre 1867 et 1891, qui déposa des brevets relatifs à un système à base de fer et de ciment pour fabriquer des bacs à fleurs, des tuyaux et des réservoirs à eau. Et après c'est au tour de François Coignet de construire en 1852 le 1^{er} immeuble en béton coulé avec fers profilés enrobés [1].

En 1930, un pas conceptuel important est alors franchi avec l'invention du béton précontraint par Eugène FREYSSINET .L'utilisation de la précontraint autorise la maîtrise de la distribution des contraintes dans la matière. Elle permet d'obtenir une grande résistance à la compression du béton tout en évitant les inconvénients dus à sa faible résistance à la traction [36].

À partir de 1980, on fabrique et on met en place des bétons à hautes performances(BHP) dont la résistance à la compression atteint 100 MPa, et même 140 MPa dans un immeuble à Seattle aux Etats-Unis [36].

Par la suite Pierre RICHARD ont développés des bétons de poudres réactives (BPR) et utilisés pour la première fois de la construction de la passerelle de Sherbrooke [9].

Et puis 1986, L'idée de produire des BAP est apparue pour la première fois au Japon, où Okamura a proposé l'utilisation des BAP après avoir effectué une étude fondamentale sur la fluidité du béton et avoir développé un mélange fortement liquide qui a une grande déformabilité. Depuis le Japon fut pionnier dans le développement de cette nouvelle technique [5].

En 1988, les premiers prototypes pratiques du BAP ont été produits en utilisant des matériaux déjà sur le marché. Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique des bétons coulés sous l'eau ; en effet, la première génération des BAP est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée [2].

Ensuite en 1996, les pays européens ont commencés de formuler ces bétons et les utiliser dans la construction de ponts, des murs et des tunnels [2].

Et en 2003, les instituts de production et de la préfabrication américaine ont pu définir les BAP comme : [25]

- ✓ Un béton fluide et non ségrégeable qui peut remplir le coffrage sans consolidation ;
- ✓ Un béton fortement réalisable pour les structures complexes ;
- ✓ Un béton qui tient son homogénéité dans n'importe quel type de coffrage.

Les bétons autocompactants de l'anglais Self Compacting Concrete (SCC) marquent une nouvelle étape dans la technologie des bétons, leur atout : Une mise en œuvre facile qui engendre toute une chaîne d'avantage [27].

Le béton autocompactant est également dénommé béton autoplaçant pour les parois verticales, ou encore autonivelant pour les parois horizontales. Ce pendant, l'appellation la plus utilisée aujourd'hui dans le domaine de la construction est BAP [4].

I.4 Domaines d'utilisation des BAP

La technologie de bétonnage par BAP ne cesse d'augmenter dans nombreux domaines de la construction : constructions, renforcement et réparation d'ouvrages d'art (application de couches minces dans des endroits difficile d'accès), construction d'éléments préfabrication à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour toute utilisation (béton coulés sous l'eau pour des réparations, béton confinés, pieux...) [27].

Le BAP est aussi une solution bien adaptée pour

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



Application du BAP dans les planchers



Application du BAP dans la préfabrication

Figure 4 : Quelques exemples d'utilisation de BAP [31]

L'utilisation des BAP s'inscrit dans l'intégralité des DTU et des normes NF EN 206-1. Les ouvrages en BAP obéissent aux mêmes règles de calcul de fissuration et de normes de parement que pour un béton classique notamment en cas de réponse à une exigence esthétique et/ou d'étanchéité. En effet, selon l'AFGC, les BAP sont classés selon trois catégories suivant leur domaine d'application. Le classement s'effectue selon leur intervalle d'écoulement I (tenant compte de la géométrie du coffrage et de la

disposition des armatures), le type d'application, et l'épaisseur de la structure dans le cas d'une application horizontale [2].

Tableau 1 : Classification des BAP selon leur application [2]

| Intervalle d'écoulement (mm) | Application horizontale | | Application verticale |
|---------------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| | Epaisseur ≤ 300mm | Epaisseur > 300 mm | |
| $I \geq 100$ | 1 | 2 | 2 |
| $80 \leq I \leq 100$ | 2 | 2 | 3 |
| $I < 80$ | 3 | 3 | 3 |

Les classes 2 et 3 contiennent deux sous-classes en fonction de la longueur maximale de cheminement horizontal du BAP : 5m pour les classes 2a et 3a, 10 m pour les classes 2b et 3b.

I.5 Les Avantages et inconvénients des BAP

Les BAP présentent de nombreux avantages : [14]

- Mise en œuvre sans vibration ;
- Bétonnages plus rapides et optimisation de productivité sur chantier ;
- Coulage de murs verticaux de grande hauteur ;
- Bétonnage de formes complexes avec un excellent remplissage ;
- Plus grande fluidité pour un meilleur pompage ;
- Enrobage des armatures amélioré ;
- Optimisation de la qualité de parement ;
- Amélioration des conditions de travail sur le chantier ;
- Absence de nuisance sonore liée à la vibration.

Comme inconvénients, on distingue

La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et l'entrepreneur du chantier. En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de

discussions s'imposent. De plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours disponibles de stock chez les fabricants [20].

I.6 La Spécificité de la composition des BAP

L'avantage des bétons autoplaçant 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 [9].

- Un volume de pâte élevée ;
- Une quantité de fines élevée ;
- L'utilisation de superplastifiant ;
- Un faible volume de gravillons ;
- Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau dit agent de viscosité.

I.6.1 Un volume de pâte élevé

En considérant le béton comme un mélange de pâte et de granulats, il existe une quantité de pâte minimum nécessaire au remplissage des interstices entre les granulats. La quantité de pâte supplémentaire provoque une certaine dispersion des granulats, limitant ainsi les frottements intergranulaires, et confère au matériau sa fluidité (figure 5) [28].

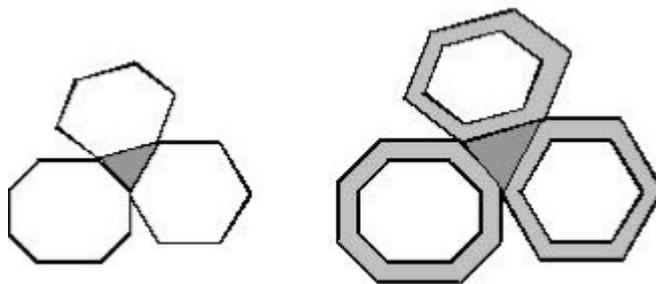


Figure 5 : dispersion des granulats par excès de pâte[35]

Certains auteurs ont effectivement mis en évidence l'existence d'une relation entre la quantité de pâte de ciment et l'étalement du béton (figure 6) [35].

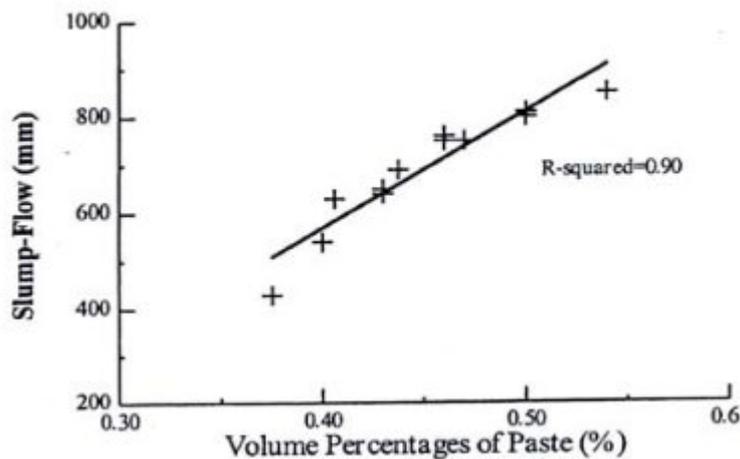


Figure 6 : Relation entre l'étalement et la quantité de pâte d'un béton [35]

I.6. 2 Une quantité de fines élevée

Le but de l'augmentation de la quantité de fines (qui peut atteindre environ 500kg /m³) est d'assurer la maniabilité, de limiter les risques de ressuage et de ségrégation.

Les plus utilisées sont : [1]

- 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.6. 3 L'utilisation de superplastifiants

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 [28].

I.6.4 Un faible volume de 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 [28].

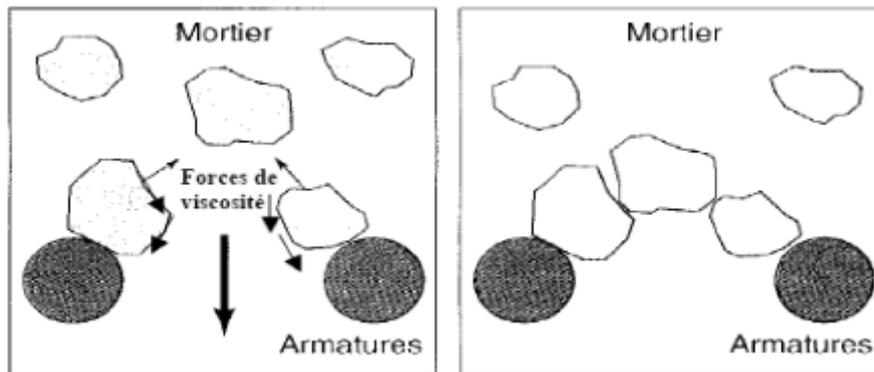


Figure 7 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [33]

I.6.5 Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau dit agent de viscosité

Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, Qui augmentent la viscosité de l'eau (Figure 8). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse [8].

Ces adjuvants semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau /liant élevés, mais leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant le rapport eau/liant faibles [3].

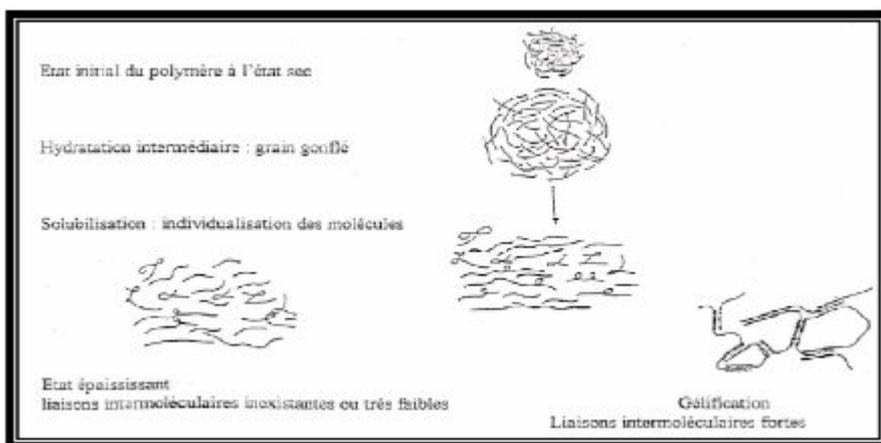


Figure 8: Interaction entre l'eau et les polysaccharides (d'après [Hasni 1999]) [35]

I.7 propriétés des BAP à l'état frais

Les BO sont des matériaux qui se mettent en place sous l'effet de sollicitations extérieures ou intérieures telles que la vibration. Les BAP de leur côté se comportent comme des fluides plus ou moins visqueux et se mettent en place sans sollicitation. De ce fait, les deux bétons se comportent de façon très différente. Sur chantier, le test d'affaissement au cône d'Abrams est très utile pour caractériser les BO, alors qu'il n'est utilisé que pour mesurer l'étalement de la galette d'un BAP et le temps de passage à une galette intermédiaire de 50 cm de diamètre. Or, un seul test ne suffisant pas à prédire la qualité d'un BAP. Plusieurs tests ont été développés pour caractériser les propriétés du BAP. Les propriétés générales d'un BAP frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en deux critères mesurables par des tests empiriques : la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles qui sont désignées par capacité de remplissage aux recommandations de l'AFGC [24].

I.7.1 La résistance à la ségrégation

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions.

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus [24].

Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. L'eau libre dans le béton est généralement mobile et peut trouver son chemin vers la surface du béton par effet de gravité et de densité indépendamment des solides dans le mélange. Ceci à l'extrême se traduit par une couche de laitance en surface libre du béton. Des matériaux de surface granulaire plus élevée, peuvent par absorption et adsorption retenir une quantité supplémentaire d'eau libre [22].

I.7.2 La capacité de remplissage (fluidité)

Le remplissage du béton, ou déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le BAP est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son poids propre, et sans sollicitations (vibrations internes ou externes). Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de

déformation de béton .Il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation. Il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton [24].

Pour résumé, nous présentant les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir, les actions entreprises pour la mise en œuvre dans le tableau (2).

Tableau 2 : Les propriétés des BAP à l'état frais [24]

| Propriétés des BAP | Moyens d'obtention | Actions à mener dans la formulation |
|------------------------------------|--|---|
| Remplissage (fluidité) | Réduction des frictions entre les particules | Augmentation de volume de la pâte |
| | Optimisation de la pâte | Utilisation de superlastifiants |
| | | Optimisation de rapport E/C |
| Résistance à la ségrégation | Réduction de l'eau libre dans le béton | Réduction de rapport E/C |
| | | Utilisation de matériaux de grande surface granulaire |
| | | Utilisation d'agent de viscosité |
| | Réduction de la séparation de phases | Réduction de rapport E/C |
| | | Utilisation d'agent de viscosité |
| | | Réduction de la taille maximale des granulats |

On remarque en générale que pour réaliser un BAP il est très important d'avoir un volume plus élevés de pâte par comparaison aux bétons vibrés. Cette pâte devrait de plus posséder des propriétés optimales d'écoulement ou représentatives de l'autoplaçabilité [25].

I.8 propriétés des BAP à L'état durci

Dans cette partie, nous résumons les différences qui existent entre les propriétés des BAP à l'état durci et celles des bétons ordinaires

I.8.1 Résistance mécanique

Le BAP possède une structure plus homogène que le BO vibré, grâce notamment à une résistance à la ségrégation élevée. Les BAP présentent souvent une résistance mécanique plus élevée qu'un BO à un rapport E/C selon Assié, s [3]. L'utilisation des fillers dans la formulation des BAP génère une

accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Lorsqu'elles sont bien dispersées dans le béton, les particules fines des fillers favorisent l'hydratation du ciment, et conduisent à une matrice cimentaire de structure plus dense (par effet physique principalement). Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite [3].

I.9 Les constituants des BAP

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique chimique, et morphologique. Ainsi, nous allons décrire les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (granulats, ciment, additions minérales, adjuvants et eau), et les paramètres influents. Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. En effet, si l'un de ces constituants n'est pas présent, le béton n'existerait pas. Les bétons autoplaçants par contre, sont possibles grâce aux ajouts d'adjuvants et d'additions minérales à la composition de base du béton [2,19].

I.9.1 Granulats



Gravier



Sable

Figure 9 : les Granulats utilisé dans le béton

Sables, graviers ou cailloux constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment. Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive [18].

Selon leurs origine on distingue des granulats roulés, extrait de ballastière(ou sablière) naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir des roches exploités en carrière [15].

Ces matériaux sont quelques fois encore appelés « agrégats ».Il sont compris entre 0 et 125 mm [1].

Voici deux types de granulats (Roulés et concassés) selon la forme :



Granulats roulés.



Granulats concassés.

Figure 10: Les types de granulats selon leurs formes

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 [1].

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 appliquée à des roches extraites en carrière. Sa granulométrie peut être rendue quasi uniformément riche sur une étendue granulaire imposée par criblage. 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 [32].

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 [15].

Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles :

- **La catégorie A** correspond aux granulats destinés à la confection du béton de qualité tels que ceux destinés à la construction d'ouvrages d'art ou de bâtiments pour lesquels la résistance caractéristique est supérieure ou égale à 35 MPa ; éventuellement certaines caractéristiques des catégories B ou C étant tolérées [15].
- **Les granulats de catégorie B** sont destinés à de bons bétons ainsi qu'à ceux pouvant être situés dans un environnement agressif, à condition que leur coefficient d'absorption respecte les spécifications imposées aux granulats de catégorie A [15].

- **Les granulats de catégorie C et D** conviennent pour les bétons courants à condition, dans le cas d'utilisation de granulat D, que seuls deux de leurs caractéristiques soient présentés et que les autres correspondent à celle de catégories supérieures, faute de quoi ils ne doivent pas être utilisés dans la courante confection de béton [15].

Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment.

I.9.2 Ciment

Les ciments les plus courants dans le monde du génie civil, sont les ciments à base de clinker Portland, produit obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile à 1450°C. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique Un composant majeur du clinker [15].



Figure 11 : Ciment

C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

I.9.2.1 Les principaux constituants du ciment portland

Sont énumérés dans le tableau 3 Avec leur symbole abrégé. En effet cette notion abrégée, utilisée par les chimistes de l'industrie du ciment décrit chaque oxyde par une lettre.

Tableau 3 : Les composantes du CPA [23]

| Composé | Composition | Abréviation |
|---------------------------------|--|-----------------------|
| - Le silicate tricalcique | 3CaOSiO_2 | C_3S |
| -Le silicate bicalcique | 2CaOSiO_2 | C_2S |
| -L'aluminate tricalcique | 3CaOSiO_2 | C_3A |
| -L'ferroaluminate tetracalcique | $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_2$ | C_4AF |

I.9.2.2 Les différents types du ciment

En principe tous les ciments conformes à la norme SN EN 197-1 conviennent pour la fabrication de béton BAP. Les exigences particulières de fluidité du BAP imposent un dosage en pâte de ciment très élevé, raison pour laquelle ce béton comprend en général aussi des additions minérales. La plupart du temps, il s'agit de cendre volante siliceuse selon SN EN 450 ou de farines inertes de quartz ou de calcaire. A cet égard, la cendre volante a un effet favorable, puisqu'elle permet généralement d'abaisser le rapport eau sur ciment E/C. Les hautes exigences requises pour un BAP ont conduit au développement de ciments Portland composés spécialement adapté à la fabrication sûre et stable du BAP [23].

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type : du calcaire, du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des fines calcaires, de la pouzzolane naturelle, des schistes calcinés, des fumées de silice [15].

Dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capable de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques. [25]

Selon leurs teneurs en clinker et les autres constituants les différents types du ciment sont définis dans

I- BAP : Composantes et caractéristiques

Le tableau 4 ci-dessous qui donne les teneurs en pourcentage de ces constituants.

Tableau 4 : Les différents types du ciment [15]

| Désignations | Types de Ciments | Teneur en Clinker | Teneur En % des autres constituants |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------|---|
| CPA-CEM1 | Ciment portland | 95 à 100% | |
| -CPJ- CEM II/A | Ciment portland composé | -80 à 94% | -de 6 à 20% de l'un quelconque des constituants, Sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% |
| -CPJ-CEM II/B | | -65 à 79% | -de 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus |
| -CHF-CEM III/A | Ciment de haut-fourneau | -35 à 64% | -36 à 65%de laitier haut-fourneau |
| -CHF-CEM III/B | | -20 à 34% | -66 à 80% de laitier de haut-fourneau |
| -CLK-CEM III/C | | -5 à 19% | -81 à 95% de laitier de haut-fourneau |
| -CPZ-CEM IV/A | Ciment pouzzolanique | -65 à 90% | -10 à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces derniers étant limités à 10%. |
| -CPZ-CEM IV/B | | -45 à 64% | -36 à 55 % comme ci –dessus |
| -CLC-CEM V/A | Ciment au laitier et aux cendres | -40 à 64% | -18 à 30% de laitier de haut-fourneau et 18 à30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes |
| -CLC-CEM V/B | | -20 à 39% | -31 à50% de chacun des 2 constituants comme ci-dessus |

I.9.3 L'eau de gâchage

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton, on bien l'influence qu'il a sur la propriété du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats) [1].



Figure 12:L'eau

Ce constituant peut en influencer la qualité du béton, en fonction de sa qualité et quantité pour cela il ne doit pas contenir de matière de suspension au-delà des tolérances règlementaires : [15]

- 2g/l pour les bétons à haute résistance,
- 5g/l pour les bétons à faible résistance.

L'eau introduite lors du gâchage remplit deux fonctions [15]:

- l'une physique qui confère au béton les propriétés rhéologiques d'un liquide ;
- et l'autre chimique qui contribue au développement de la réaction dite d'hydratation.

I.9.4 L'emploi de superplastifiant

Un superplastifiant 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 [19].

I.9.4-1 Mode d'action des superplastifiants

Les (super)réducteurs d'eau ou (super)plastifiants) sont des molécules polaires qui présentent une extrémité fortement chargée, qui vient neutraliser un site opposé sur les grains de ciment. Généralement, les grains de ciment anhydres sont chargés électriquement à leur surface, du fait de la rupture de liaisons électriques entre les cations et les anions pendant le broyage [18]. Il est observé que les grains de ciment anhydres sont plus chargés négativement que positivement à la sortie des broyeurs. Il existe une certaine cohésion entre les grains de ciment qui les maintient « collés » les uns aux autres formant des floccs. Cette cohésion est associée à des phénomènes d'attraction électrique entre plages de signes différents à la surface des grains ainsi qu'à des forces moins spécifiques dites de Van Der Waals [2].

Les polymères viennent alors s'adsorber sur les surfaces chargées et dispersent les floccs de ciment. Le défloculant ajouté en quantité non négligeable libère les particules de ciment entre elles en cassant les forces capillaires dans le cas de formation de ménisques d'eau ou les forces électrostatiques de Van der Waals dans le cas de floccs formés à partir des charges électriques des particules de ciment. Celui-ci permet ainsi de supprimer un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment. [35]

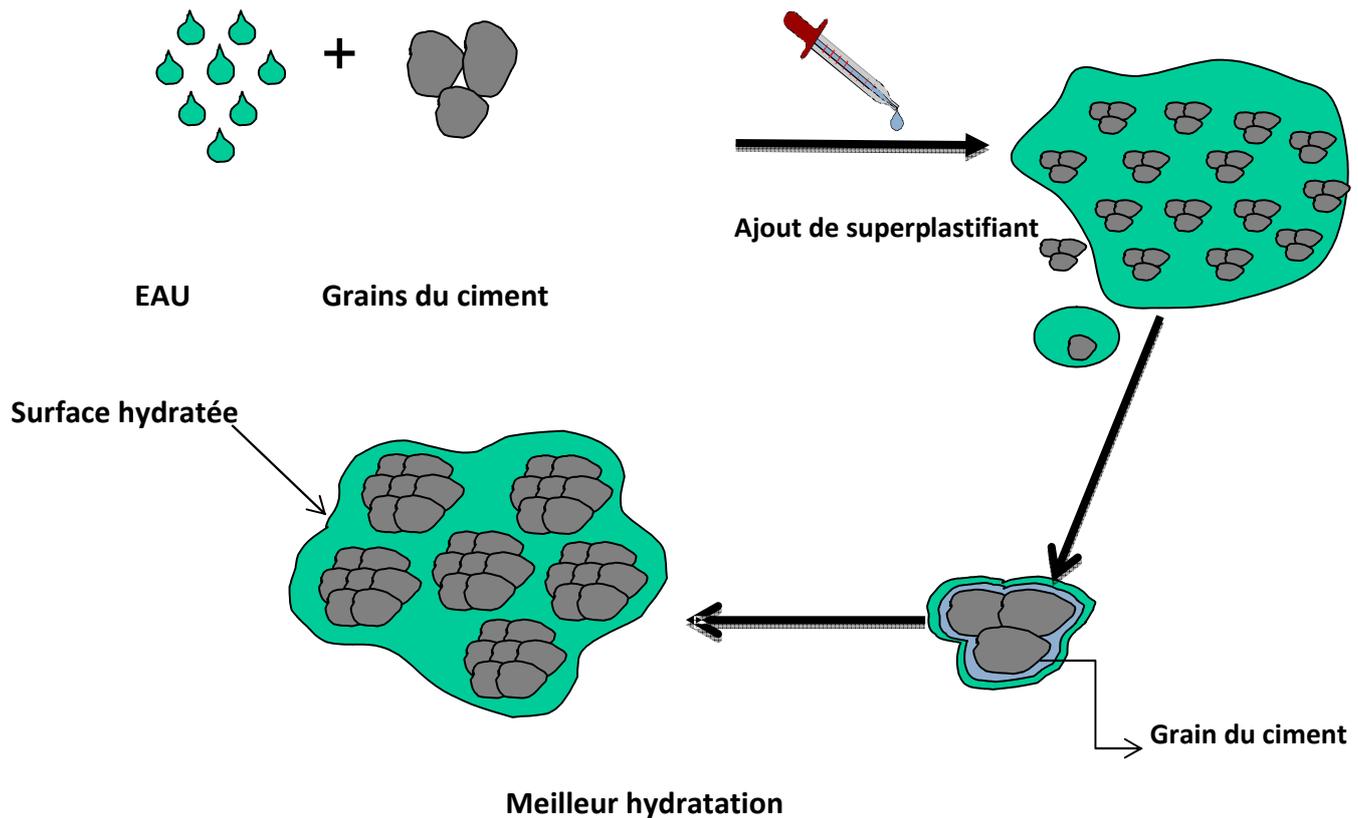


Figure 13 : Défloculation des grains de ciment par le superplastifiant [35]

Lors de l'ajout du superplastifiant

Les molécules du superplastifiant agissent sur les particules du mélange en s'adsorbant à leurs surfaces, et en réduisant les forces de Van Der Waals, une fois ces forces diminuées les particules sont défloculées [24].

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.

I.9.5 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. Pour minimiser cet effet l'ajout d'un agent de viscosité s'avère nécessaire [28].

Les agents viscosant sont des polymères qui ont été développées pour éviter le « délavement » à l'état frais des bétons coulés sous l'eau. Ils sont de différentes natures et peuvent être classés selon 3 catégories en fonction de leurs mécanismes d'action [21].

- **Adsorption** : La longue chaîne de polymère adhère à la périphérie des molécules d'eau. Cela a pour effet d'adsorber et de fixer une partie de l'eau d'ajout. Il y a augmentation de la viscosité de l'eau d'ajout et donc de la pâte de ciment [21].

- **Association** : Les molécules au contact de la chaîne de polymère développent des forces d'attraction. Le mouvement de l'eau est ainsi bloqué par la création d'un gel et sa viscosité est augmentée [21].

- **Entrelacement** : Pour un faible taux de cisaillement et particulièrement pour une forte concentration, la chaîne des polymères peut s'entrelacer et s'enchevêtrer ce qui augmente la viscosité apparente. L'enchevêtrement peut se délier lorsque la vitesse de cisaillement augmente. La chaîne de polymère s'oriente alors dans le sens de l'écoulement ce qui diminue la viscosité apparente [21].

I.9.6 Les additions minérales

Le béton autoplaçant requiert souvent pour l'amélioration de ses propriétés rhéologiques, l'addition de particules fines inertes ou réactives, qui régulent aussi la quantité de ciment dans la formulation et réduisent ainsi la chaleur d'hydratation cause d'un fort retrait [35].

Ce sont des produits de dimension granulaire inférieure à 80µm, obtenus par broyage fin, récupération des déchets des centrales thermiques ou pulvérisation de certaines roches (calcaire, silice, etc.) [35].

L'utilisation des ajouts minéraux a des avantages : techniques ; économiques et écologiques.

➤ **Avantages économiques et écologiques :**

La plupart des additions minérales sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). Ainsi l'incorporation des additions minérales à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc

à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO₂ de l'industrie cimentière dans la nature [6,17].

➤ **Avantages techniques**

En général, les additions minérales influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci ; elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau. Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les additions minérales réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique [24].

I.9.6-1) Classification des additions

A) Les fillers

Ils sont élaborés à partir de matériaux calcaires, de dolomites ou de calcites finement écrasés. Ce sont de bons correcteurs de courbes granulométriques utilisés aussi pour augmenter la quantité de fines. La taille dans une gamme inférieure à 0,125mm sera un très grand avantage [35].

Il est à noter que la dolomite peut présenter des problèmes de durabilité à cause de la réaction alcali-carbonate. Le filler calcaire intervient dans la rhéologie des pâtes de ciment par sa granularité et sa réactivité chimique. Il forme avec la pâte de ciment une liaison qui améliore les résistances mécaniques par comparaison à l'effet d'un filler inerte comme le quartz. Cette liaison peut être renforcée par l'utilisation de fillers mixtes (calcaire + silice réactive) ou de rapports eau/ciment plus faibles [18].

B) Les fumées de silice

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

C) Cendres volantes

Les cendres volantes sont conformes à la norme EN 450. Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse résultant de la combustion, en centrale thermique, de minéraux solides. C'est un matériau inorganique fin qui a des propriétés pouzzolanique à long terme. La cendre volante silico-alumineuse (classe F) est principalement vitreuse. Elle peut contenir des phases cristallisées comme le quartz, la mullite, la gehlénite, des spinelles Pouzzolanique, Elle met du temps à réagir. Sa combinaison avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment commence à 28 jours. Ainsi, l'ajout de cendre volante réduit le risque de fissuration due à l'élévation de température lors de l'hydratation du ciment. Plusieurs recherches ont montré que l'usage de cendre volante dans les BAP améliore les propriétés rhéologiques et donc réduit le dosage en superplastifiant utile à l'obtention d'un étalement similaire à celui d'un BAP sans ajouts [35].

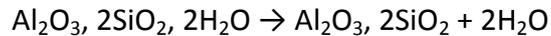
D) Le laitier de haut fourneau

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 m²/kg à 500 m² /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 [1].

E) Métakaolin (MK) [11]

Le métakaolin (MK) est une addition minérale (classée ultrafine) possédant des propriétés pouzzolaniques. Cette pouzzolane est obtenue par la calcination d'argile, la kaolinite, dont la pureté en kaolin est importante. Après l'évaporation de l'eau adsorbée entre les feuillets d'argile (T > 100°C), la phase de déshydroxylation (perte des groupements hydroxyles liés physiquement aux feuillets d'argile qui se produit entre 700 et 800°C) entraîne une destruction de la structure cristalline du kaolin qui ne recristallise pas. Le traitement thermique entraîne donc le passage d'une phase cristallisée et ordonnée

(kaolinite) en une phase désordonnée (métakaolinite) par un effondrement du réseau cristallin. La transformation du kaolin par calcination au métakaolin s'effectue selon la réaction



L'objectif de la calcination est de rendre pouzzolanique des matériaux peu réactifs par déshydroxylation.

Deux types de calcination sont employés industriellement pour obtenir le MK.

Deux types de calcinations sont employés industriellement pour obtenir le métakaolin.

✓ **Calcination lente dite à lit fixe**

Dans la calcination lente industrielle, la déshydroxylation est complète après avoir été menée lentement à une température suffisamment haute (entre 600°C et 800°C) pendant une durée suffisamment longue (5 heures de cuisson). Pour la calcination lente, le cru est préalablement calciné puis broyé très finement ($D_{\text{max}} = 20 \mu\text{m}$), ce qui nécessite plus d'énergie [11].

✓ **Calcination « flash »**

La calcination « flash » est une calcination très rapide d'un solide, généralement sous formes fine en suspension dans un gaz. Le chauffage et le refroidissement sont de l'ordre de quelque dixième de secondes. Bien que la plupart des transformations chimiques et physiques aient une cinétique rapide à haute température, le temps très court de résidence dans le four mène à des transformations qui peuvent partiellement ne pas être achevées. Les changements sont cinématiquement arrêtés et la déshydroxylation peut être incomplète si le temps d'exposition est trop court. Les propriétés des solides préparés sous ces procédés dit « flash » sont différentes a pu être atteint. La rapide élévation de la température à l'intérieure des particules génère une vapeur d'eau qui ne peut pas s'échapper par diffusion : la déshydroxylation a eu lieu plus vite que la libération. Devenant déformable sous l'effet de la chaleur, les particules vont se modifier pour libérer les bulles de vapeur d'eau sous pression (principe du pop-corn) [11].

Le refroidissement rapide bloque alors toute évolution et conserve l'aspect bulleux ou troué des particules. Pour la méthode « flash », le cru est broyé finement ($D_{\text{max}} = 80 \mu\text{m}$) puis la poudre est propulsée près de la flamme de calcinateur [11].

Nous avons effectué une revue générale sur les rôles des constituants influents dans la formulation des BAP et décrit les mécanismes d'action des différents constituants, ainsi que l'influence des paramètres principaux sur les caractéristiques des BAP. Un bilan de cette revue est représenté dans le tableau 5 sous forme de synoptique générale.

Tableau 5 : Rôles des principaux paramètres dans la caractérisation et la formulation des BAP

| Constituants et paramètres principaux | Rôles principaux dans la formulation |
|--|--|
| Eau (E) | Fluidité et hydratation (lié à la concentration volumique en solides et au rapport E/C) |
| Ciment (C) | Liant (lié à la concentration volumique en solides et au rapport E/C) |
| Concentration volumique en solides | Encombrement, plus de frictions entre les particules |
| Granulats | Réduction du coût du béton, performances mécaniques variables selon le type |
| Additions minérales | Optimisation du squelette granulaire du béton, avantages environnementaux et économiques |
| Filler calcaire (F) | Amélioration de l'écoulement au-dessous du dosage critique |
| Superplastifiant (sp) | Défloculation, dispersion des particules de ciment |
| Agents de viscosité (AV) | Résistance à la ségrégation, cohésion |

Ce tableau ne reporte pas l'influence des paramètres sur les propriétés des BAP à l'état durci. Le rapport E/C, qui a une influence importante sur les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons et qui est un paramètre déterminant sur les propriétés à l'état frais (écoulement, stabilité) est pris en compte par le paramètre concentration volumique en solides (en raison de la quantité importante de fines minérales dans les BAP [24]).

I.10 Fabrication, transport et mise en place des BAP

I.10-1 Fabrication

Tous les types de malaxeur conviennent en principe pour la fabrication du BAP. De bons résultats sont obtenus avec les modèles courants de malaxeur, de ceux à cuve et train de palettes à axes verticaux comme de ceux à auge et arbres rotatifs à axes horizontaux, utilisés aussi bien en centrale de béton prêt l'emploi, en centrale de chantier ou en usine de préfabrication [36].

Pour la fabrication d'un BAP, notamment pour l'introduction de ses différents constituants, on appliquera les mêmes procédures que celles recommandées dans le cas du béton vibré bien entendu en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier. Une attention spéciale doit être accordée à l'humidité des granulats, dont les variations devraient être le plus possible limitées. Des sondes d'humidité dans les silos granulats sont vivement conseillées à cet effet, afin de permettre une adaptation automatique de l'ajout d'eau dans le mélange [36]. C'est la raison pour laquelle on se base généralement sur un temps de malaxage de 120 secondes, après introduction de tous les constituants. Cette valeur constitue une moyenne qui, dans certains cas, peut être légèrement adaptée en fonction de l'efficacité du malaxeur [12].

I.10-2 Transport

En raison de sa fluidité élevée, le BAP ne peut être transporté qu'au moyen d'un camion malaxeur (Figure 14). Il est indispensable de faire tourner la toupie lentement pendant toute la durée du transport. Un clapet de fermeture est recommandé pour les transports dans des endroits à forte pente. Avant de décharger le béton, il faut faire tourner la toupie à vitesse élevée durant deux minutes environ [12]. Comme dans le cas du béton vibré, l'ouvrabilité du béton BAP peut se modifier pendant la durée du transport. La manière et l'ampleur de cette modification dépendent de nombreux facteurs comme les types d'adjuvants, le dosage en eau, la durée du transport et la température. Les producteurs de béton doivent en tenir compte de manière adaptée à leur expérience [14].

Dans une certaine mesure, il est possible d'en tenir compte en corrigeant pour la fabrication les exigences d'ouvrabilité spécifiques par le client et normalement souhaitées au moment du déchargement sur le chantier. En cas de retard imprévu et du raidissement du béton qui peut s'ensuivre, il est également possible dans le cas du BAP d'effectuer certaines corrections appropriées sur le chantier. Le temps de malaxage minimal recommandé en cas de rajout d'adjuvant dans le camion

malaxeur doit être impérativement respecté, afin d'assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. Tout rajout d'eau est en revanche à proscrire [13].



Figure 14 : Les mécanismes de transport des BAP

Il est très important d'appliquer toujours et de manière rigoureuse les mêmes procédures lors de la fabrication du BAP et ceci, également pour des facteurs apparemment moins importants et souvent négligés dans le cas du béton vibré. Des résidus d'adjuvants dans le malaxeur à béton ou des restes d'eau dans le camion malaxeur, résultant de la fabrication et du transport de bétons différents, peuvent ainsi entraîner certains problèmes [13].

I.10-3 coffrage

L'estimation de la pression exercée par le béton frais ainsi que les exigences relatives à l'aspect des parements ont une influence déterminante sur le choix du type de coffrages et sur leur coût. La consistance spécialement fluide des BAP soulève en particulier la question d'une éventuelle adaptation des coffrages traditionnels en ce qui concerne la rigidité et l'étanchéité. A cet égard, de nombreux résultats d'essais permettent de dédramatiser la question. Lors du bétonnage d'un mur, la pression exercée sur les coffrages par un BAP est environ égale à la pression hydrostatique; la pression est souvent même légèrement inférieure à cette dernière (cela dépend des caractéristiques du béton, notamment de sa consistance, et de la vitesse de remplissage du coffrage). Dans le cas d'un béton traditionnel, la pression exercée sur le coffrage peut être tout aussi élevée et atteindre la pression hydrostatique pendant la vibration [31].

Dans le cas de murs en BAP de hauteur d'étage normale, aucun coût supplémentaire n'est en principe nécessaire pour assurer une rigidité et une étanchéité suffisantes des coffrages; les coffrages traditionnels en bois ou métalliques peuvent être utilisés sans précaution particulière [13].

Afin d'éviter des déformations trop importantes du coffrage et un éventuel tassement du béton mis en place, il est cependant vivement recommandé d'utiliser un matériel de coffrage suffisamment rigide

comme les coffrages panneaux avec poutrelles, les coffrages-cadres ainsi que les banches de coffrage pour des hauteurs plus importantes Les coffrages panneaux sont par contre déconseillés [20].



Coffrages panneaux avec poutrelles
($h \leq 3$ m)



Coffrages-cadres
($h = 3$ à 5 m, selon type)



Banches de coffrage
($h = 3$ à 9 m ; selon type)

Figure 15: Les différents coffrages utiliser pour les BAP

I.10-4 Mise en place

Par rapport au béton vibré, la mise en place du béton BAP est grandement facilitée et peut généralement être réalisée par une seule (Figure 17) personne, même dans le cas de volumes importants. Elle peut être effectuée avec la plupart des techniques habituelles, par exemples au moyen d'une benne, d'une pompe (depuis le haut ou depuis le bas) ou directement depuis la goulotte du camion malaxeur. En revanche, la mise en place au moyen d'un ruban transporteur n'est pas recommandé .IL est en outre conseillé de ne pas laisser tomber le béton en chute libre d'une hauteur supérieure à 3 à 5 m, afin de limiter le risque de ségrégation [36].

A ce sujet, il faut savoir que les BAP sont moins sensibles au risque de ségrégation durant la chute dans le coffrage que les bétons traditionnels vibrés. La qualité du béton BAP est largement influencée par la vitesse de mise en place et le temps dont il dispose pour se désaérer naturellement [36].



Figure 16 : Mise en place aisée du BAP par un seul ouvrier

II.1 Introduction

Réaliser un BAP est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP [24].

Il existe une très grande variété de matériaux dans le mode; et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur le béton. Ceci implique qu'il est difficile de réaliser une formulation universelle de BAP [24].

II.2 Formulation des BAP

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

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un BAP. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales [29,39].

II.2.1 Approche japonaise

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 gravillons (dans 1m^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 gravillons est en générale égale à 0,57.
- 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 et 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 [29,36].

II.2.2 L'approche suédoise

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 [34].

II.2.3 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).

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 gravillons pour éviter le phénomène de blocage. Pour assurer ces deux rôles les chercheurs jugent qu'il doit exister un volume minimum de pâte [29].

II.2.4 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 [29].

II.2.5 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.

- Dans notre cas, la formulation utilisée est une amélioration de celle formulée par Chaouche.L [7], Bezzi.T [10] et Meziani .M [26].

II.3 Caractérisation des BAP

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 [31].

La caractérisation a l'état frais des bétons s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC, à savoir l'étalement au cône, l'écoulement à la boîte en « L » et la stabilité au tamis et ressuage [2].

II.3.1 Essai d'étalement

II.3.1-1 But

L'essai d'étalement au cône permet de mesurer la consistance d'un béton.

II.3.1-2 Appareillage [16]

- Table d'étalement : table mobile, comportant un plateau plan et carré d'au moins 900 mm de côté, qui est destiné à recevoir le béton. Le plateau de la table d'étalement doit être recouvert d'une plaque en acier inoxydable, d'une épaisseur minimale de 2 mm, non attaquable par la pâte de ciment. Le plateau doit être conçu de façon à éviter toute déformation de la plaque en inox. Le centre de la table doit être marqué de deux cercles concentriques centrés de (210 ± 1) mm et de (500 ± 1) mm de diamètre.
- Cône d'Abrams : moule en métal non directement attaquable par la pâte de ciment, d'une épaisseur min. de 1,5 mm. La paroi intérieure du moule doit être lisse, sans aspérités telles que des protubérances de rivets et sans déformations locales. Le moule doit avoir la forme d'un tronc de cône creux aux dimensions intérieures suivantes :
 - diamètre de la base : (200 ± 2) mm ;
 - diamètre du haut : (100 ± 2) mm ;
 - hauteur : (300 ± 2) mm.

Les deux extrémités sont ouvertes, parallèles, et situées dans un plan perpendiculaire à l'axe du cône. Le moule doit être suffisamment lourd ou muni, à sa partie inférieure, de pattes d'appui afin de le rendre immobile durant le remplissage.

- Entonnoir, en matériau non absorbant et non directement attaquable par la pâte de ciment, ayant un collier permettant à l'entonnoir d'être placé correctement sur le cône d'Abrams spécifié ci-dessus.
- Règle, graduée de 0 à 900 mm, avec des graduations de 5 mm, le zéro étant situé à une extrémité de la règle.

- Seau d'une capacité minimale de 10 litres et muni d'un bec verseur.
- Truelle.
- Chiffon humide.
- Minuterie ou horloge capable de mesurer à 1 s près.
- Main-écope.
- Niveau.

II.3.1-3 Mode opératoire [34]

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque ainsi que le cône d'Abrams (éliminer l'eau en excès avec le chiffon humide il y a lieu de ne plus avoir d'eau libre en surface de la plaque et du moule).
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Le prélèvement est réalisé à l'aide d'un seau directement à la goulotte du mixer. S'il y a lieu d'utiliser une brouette, l'échantillon global doit être ré-homogénéisé à la main écope avant de constituer l'échantillon réduit (remplissage du seau).
- Equiper la partie supérieure du cône de l'entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, à l'aide du seau, jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement. L'enlèvement du moule doit se faire, par une remontée verticale régulière sans imprimer au béton un mouvement latéral ou de torsion, en maximum 5 s. Maintenir le moule au-dessus du béton minimum 10 s et à une hauteur (par rapport à la base du moule) de maximum 30 cm. L'ensemble des opérations, depuis le début du remplissage jusqu'à l'enlèvement du moule, doit être réalisé sans interruption et terminé en moins de 150 s.
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesurer (au centimètre le plus proche) l'étalement selon deux diamètres perpendiculaires.

- Noter ces deux valeurs D1 et D2.

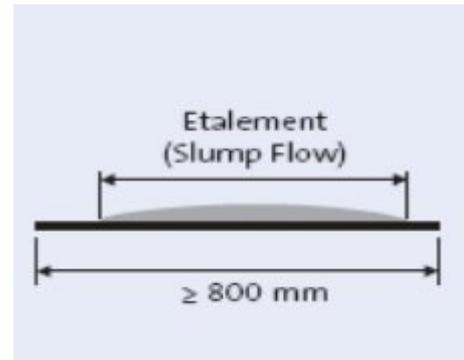
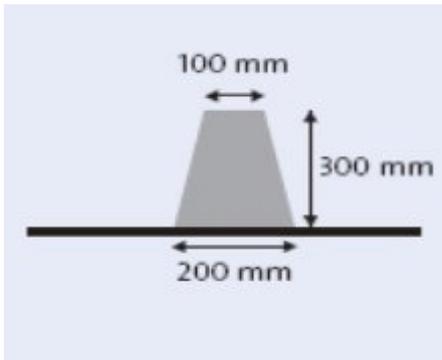


Figure 17: Essai d'étalement d'un BAP [35]

Si les deux valeurs diffèrent de plus de 5 cm, l'essai doit être rejeté et reconduit.

- Exprimer le résultat final en terme de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.
- On peut également chronométrer la valeur du T50 (temps nécessaire après soulèvement du cône pour que le béton atteigne le cercle de 50 cm).
- Après mesure de l'étalement, un contrôle visuel de la galette de béton peut aussi s'avérer intéressant. En effet, les gros granulats doivent être apparents à la surface du mélange et être uniformément répartis. De plus, sur le pourtour de la galette, il ne peut y avoir une auréole de laitance.

II.3.2 Essai de la boîte en L [28]

La boîte en L (figure 18) 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.

Le principe de cet essai, 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 H1 et H2 et exprime le taux de remplissage $H2/H1$ (figure 18) Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrailés. Pour des applications moins ferrailées, il est possible d'alléger la grille en ne mettant que deux barres distantes 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.

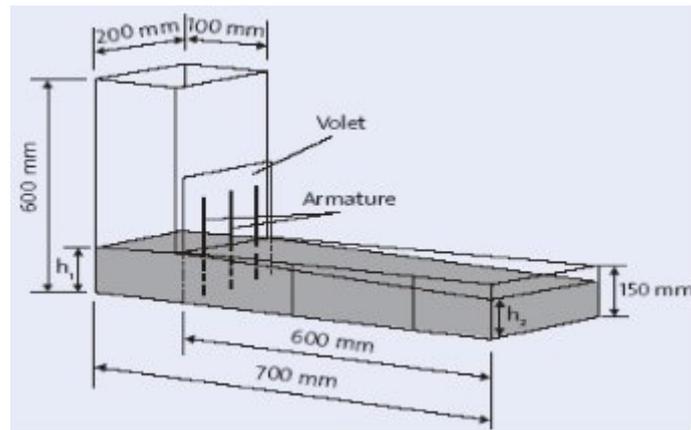


Figure 18 : boite en L

II.3.3 Essai de stabilité des tamis

II.3.3-1 But

L'essai de stabilité au tamis (figure 19) vise à qualifier les bétons vis-à-vis du risque de ségrégation.

II.3.3-2 Appareillage [34]

- Seau de 10 l muni d'un bec verseur + couvercle.
- Tamis (toile à mailles carrées) 5 mm, diamètre de 315 mm + fond.
- Bascule : précision minimale 20 g, portée minimale 20 kg.
- Minuterie ou horloge capable de mesurer à 1 s près.
- Main-écope.

II.3.3-3 Mode opératoire [34]

- Prélever un échantillon de béton représentatif.

Le prélèvement est réalisé à l'aide d'un seau directement à la goulotte du mixer. Le seau doit être rempli à raison d'au minimum 9 litres de béton. S'il y a lieu d'utiliser une brouette, l'échantillon global doit être ré-homogénéisé à la main-écope avant de constituer l'échantillon réduit (remplissage du seau).

- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation.
- Attendre 15 minutes.
- Peser le fond seul : P_{fond}
- Peser le fond et le tamis à vide.
- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau après les 15 minutes.

II -Essais et méthodes de formulation des BAP

- Verser sur le tamis une quantité de béton égale à $(4,8 \pm 0,2)$ kg ; verser ce béton au centre du tamis : hauteur de chute du béton de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$.
 - Noter immédiatement la masse réelle de l'échantillon de béton versé sur le tamis. $P_{\text{échantillon}}$
 - Attendre 2 minutes.
 - Retirer le tamis ainsi que le fond et remettre la balance à zéro.
 - Peser le fond avec la laitance : $P_{\text{fond}} + P_{\text{laitance}}$
 - Déterminer $P_{\text{laitance}} = P_{\text{fond}} + P_{\text{laitance}} - P_{\text{fond}}$
 - Calculer le pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon :
$$\pi = (P_{\text{laitance}} / P_{\text{échantillon}}) \times 100$$
- Le résultat est arrondi à l'entier le plus proche.

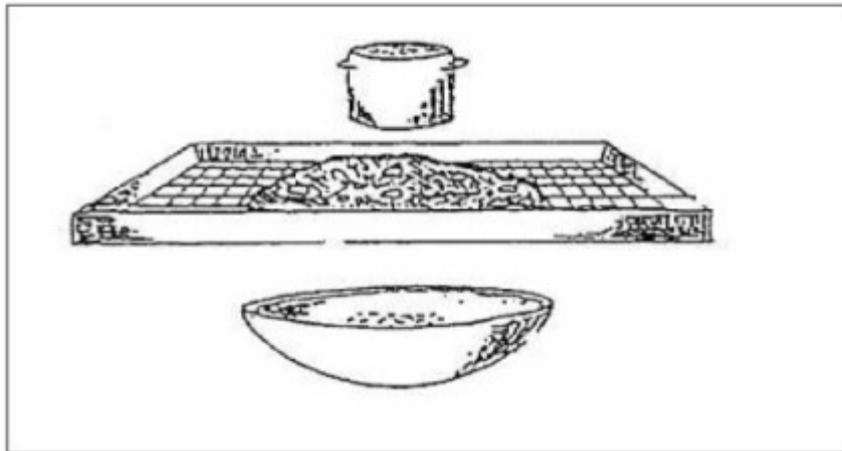


Figure 19: Essai au tamis [35]

II.3.4 Essai d'entonnoir (V-Funnel) et d'étalement modifié (J-Ring)

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la figure 20, est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du BAP. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton BAP [31].

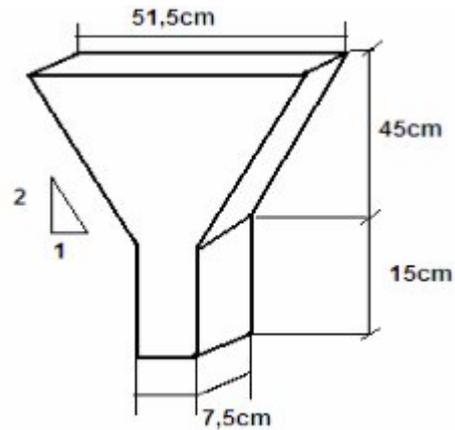


Figure 20 : Essai de l'entonnoir

L'essai d'étalement modifié (J-Ring) fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir 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 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature \varnothing 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances 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 lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau (Figure 21) [31].

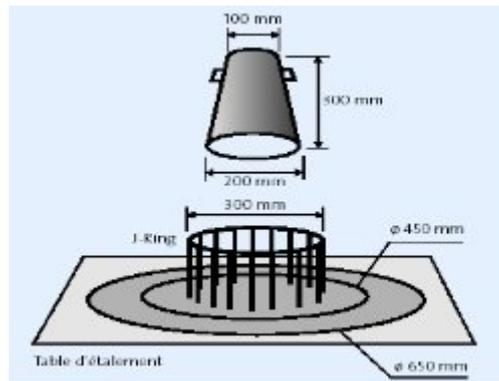


Figure 21 : Essai d'étalement modifier [2]

II.3.5 Essai du caisson

L'essai de la figure 22 ci-dessous 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 [19]:

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%.

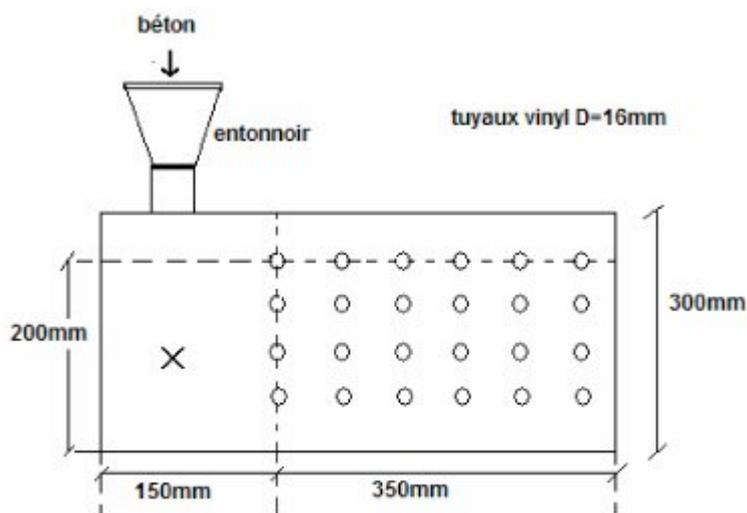


Figure 22: Essai du caisson.

II.4 Conclusion

Ce qui différencie le BAP du BO 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) [27].

Avant d'accepter une formulation comme celle d'un BAP il faut s'assurer que ce béton possède les qualités espérées. Le BAP doit vérifier : la fluidité, la stabilité, l'aptitude au remplissage, la déformabilité, la résistance à la ségrégation (statique et dynamique), la résistance au ressuage [27,36].

Partie Pratique

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 normalisés.

I.1 Les matériaux utilisés

I.1-1-1 Les Granulats

A- le sable

Le sable utilisé est un sable de carrière, sa fraction 0/3, sa courbe granulométrique est donnée sur la figure (26) page 44.

B- Les graviers

Deux classes granulaires de graviers sont employées dans ce travail; la fraction 3/8 et la fraction 8/15. Leurs courbes granulométrique sont données sur la figure(26) page 44.

I.1-1-2 Le Ciment

Le ciment utilisé est le ciment CEM II/B (32.5), sa courbe sédimentométrique est donnée sur la figure(31) page 54.

I.1-1-3 Les additions

1-Les Fillers

Les fillers calcaires utilisés sont issus du ponçage de carrelage. Ils sont de type calcaire; leur courbe sédimentométrique est présentée sur la figure 31.

❖ Préparation des fillers calcaires

La préparation se fait par trois étapes essentielles :

- **Etuvage** : l'étuvage des fillers se fait dans un étuve chauffée à 110°C pendant 48 heures jusqu' à stabilité de leurs poids.
- **Broyage** : Le broyage des fillers a été mené jusqu'à avoir une finesse de 63 µm.
- **Tamisage** : cette étape consiste à faire passer les filler dans un tamis de 63µm après broyage.



Figure 23 : Les Fillers calcaires

2-L'Argile

❖ Préparation De L'argile Etudiée

La préparation de l'argile passe par trois étapes essentielles :

- Etuver l'argile: cette étape s'est faite en faisant passer dans une étuve chauffée à 110°C l'argile jusqu'à stabilisation de poids ce qui a duré 48 heures. Le taux d'humidité mesuré sur l'argile est de 11%.
- Broyage de l'argile : le broyage de l'argile a été mené jusqu'à avoir une finesse de 63 μm . Nous avons préféré broyé l'argile avant cuisson car l'inverse (cuisson ensuite broyage) nécessite beaucoup plus d'énergie.
- Cuisson de l'argile : l'objectif de la calcination est de rendre pouzzolanique des matériaux peu réactifs par déshydroxylation. L'argile crue broyée est cuite dans un moule en fente sous couvercle introduit dans un four électrique à 750°C pendant une heure et la cuisson à cette température est déduite à partir de [11]. Une fois cuite il a été remarqué la formation de particules agglomérées ce qui a nécessité un nouveau passage au tamis.

La figure 24 montre l'argile après broyage et cuisson.



Figure 24 :L'Argile cuite et broyée

I.1-1-4 L'Adjuvant

Un superplastifiant haut réducteur d'eau à base de polycarboxylates à été employé pour assurer une fluidité satisfaisante. Sa densité est de 1.07, son pH 6.5 et l'extrait sec 30%. Le dosage conseillé est de 0.5 à 2%, du poids du ciment.

I.1-1-5 L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage du béton est celle du robinet du laboratoire MDC de l'université A-Mira Bejaia.

I.2 Identification des matériaux

La cratérisation des matériaux passe généralement par :

- ✓ L'analyse granulométrique,
- ✓ Les masses volumiques apparentes et absolues,
- ✓ La résistance au choc.

I.2-1 Les Granulats

I.2.1-1) Echantillonnage

C'est l'opération qui consiste à prélever un échantillon représentatif du matériau pour effectuer les essais. Elle peut se faire par quartage en suivant la norme NF P (18-553) ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillonnage de nos granulats s'est fait par quartage.

➤ Quartage

Un échantillon (matériau) de départ est divisé en quatre proportions égales on retire les deux quarts opposés et les deux autres seront reniées cette première opération homogénéise l'échantillon. Un nouveau quartage est effectué sur cette sélection, on obtient ainsi un échantillon représentatif de celui de départ.

I.2.1-2 Analyse granulométrique

La granularité est la distribution par dimension des grains d'un granulat. Elle permet de déterminer les caractéristiques géométriques des différentes familles des granulats.

L'analyse granulométrique est la méthode d'essai pour déterminer la granularité. Cette opération consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrés (de 0,063 jusqu'à 80mm) dont les dimensions sont placés par ordre décroissant et peser le refus obtenu sur chaque tamis. On trace ensuite la courbe.



Figure 25 : La colonne des tamis

I- Procédure expérimentale

➤ Préparation des échantillons

Après quartage en suivant les exigences de la norme **P 18-553**, une quantité de granulats de masse M est prélevée. La masse M de l'échantillon pour l'essai doit être comprise entre $0.2D_{\max}$ et $0.6 D_{\max}$, avec M est exprimé en kilogramme et D_{\max} est la plus grande dimension du granulat spécifié en millimètre.

Soit M la masse de l'échantillon choisi.

Les résultats des analyses granulométriques du sable 0/3, des graviers 3/8 et 8/15 sont représentées dans respectivement sur les **tableaux (6), (7) et (8)**.

Tableau 6 : Analyse granulométrique du sable 0/3

| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M = 1600$ gr | | | |
|--|--------------------------|--|---|
| Ouvertures des tamis (mm) | Refus cumulés R_n (gr) | Refus cumulés en (%) $R(\%) = (R_n/M) \times 100$ | Tamisât cumulés en (%) $T(\%) = 100\% - R(\%)$ |
| 5 | 20 | 1.25 | 98.75 |
| 2.50 | 28 | 1.75 | 98.25 |
| 1.25 | 506 | 31.62 | 68.38 |
| 0.63 | 963 | 60.18 | 39.18 |
| 0.315 | 1266 | 79.12 | 20.87 |
| 0.160 | 1478 | 92.37 | 7.63 |
| 0.080 | 1560 | 97.5 | 2.5 |
| Module de finesse (NF P 18-540): $MF = 1/100 \sum$ Refus cumulés en % des tamis {0,16- 0,315- 0,63- 1,25- 2,5- 5 mm} MF=2.66 | | | |

Tableau 7 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $P = 1815$ gr | | | |
|---|--------------------------|--|---|
| Ouvertures des tamis (mm) | Refus cumulés R_n (gr) | Refus cumulés en (%) $R(\%) = (R_n/P) \times 100$ | Tamisât cumulés en (%) $T(\%) = 100\% - R(\%)$ |
| 10 | 98 | 5.39 | 94.6 |
| 8 | 472 | 26.00 | 74.00 |
| 6.3 | 1075 | 59.22 | 40.77 |
| 5 | 1455 | 80.16 | 19.83 |
| 2.5 | 1810 | 99.72 | 0.27 |
| 1.25 | 1811 | 99.77 | 0.22 |

I- Procédure expérimentale

Tableau 8 : Analyse granulométrique du gravier 8/15

| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : P = 3154 gr | | | |
|---|-----------------------|---|---|
| Ouvertures des tamis (mm) | Refus cumulés Rn (gr) | Refus cumulés en (%) $R(\%) = (Rn/P) \times 100$ | Tamisât cumulés en (%) $T(\%) = 100\% - R(\%)$ |
| 16 | 111 | 3.51 | 96.48 |
| 12.5 | 1170 | 37.09 | 62.90 |
| 10 | 2341 | 74.22 | 25.77 |
| 8 | 2742 | 86.93 | 13.06 |
| 6.3 | 3140 | 99.55 | 0.44 |
| 5 | 3145 | 99.71 | 0.28 |

Sur la figures (27) ; on présente les courbes granulométriques du sable 0/3 ; gravier 3/8 et 8/15

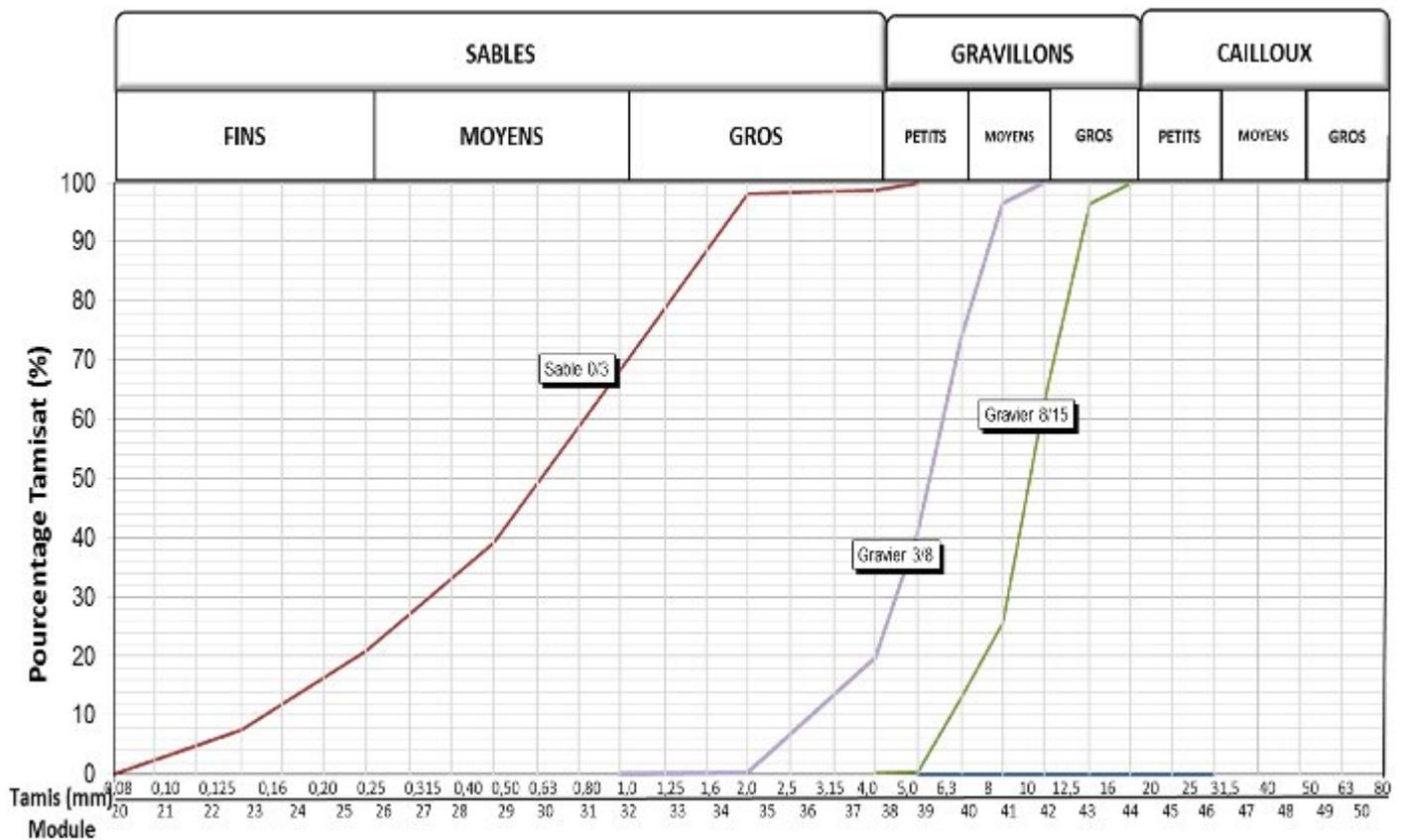


Figure 26 : La courbe d'analyse granulométrique

I.2.1-3 Résistance au choc

La résistance au choc se fait par l'essai Los Angeles selon la norme NF P 18-573. L'essai consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1.6mm, produite par la fragmentation du matériau testé, et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations pendant 15mn.

La masse de la charge des boulets varie suivant les classes granulaires.

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieure à 1.6mm produite au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité : **100 m/M**

Cette quantité sans dimension est appelée par définition, coefficient Los Angeles du matériau (LA)

❖ Matériel utilisé :

➤ La machine Los Angeles, comporte :

-un cylindre creux en acier de $12 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de $711 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ et une longueur intérieure de $508 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Le cylindre est supporté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ne pénétrant pas à l'intérieur du cylindre ; le montage est tel que le cylindre peut ainsi tourner sur son axe qui doit être horizontal.



Figure 27: l'appareil de Los Angeles

-Une ouverture de 150 mm de largeur, sur toute la longueur du cylindre, permet d'introduire l'échantillon.

- la charge est constituée par des boulets sphériques de 47 mm de diamètre environ et pesant 420 et 445 g.
- un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours/minute.

Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai, un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.

➤ Préparation de l'échantillon

L'échantillon est préparé par quartage pour les deux classes granulaires, et d'après le tableau des classes granulaires, la masse de l'échantillon est 5000g pour les deux classes.

I- Procédure expérimentale

➤ Exécution de l'essai

-On introduit avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon de l'essai. On place le couvercle. On fait effectuer à la machine 500 rotations, à une vitesse 30tr/min. Après que la machine s'arrête on fait recueillir le matériau dans un bac placé sous l'appareil, puis on fait tamiser ce matériau avec le tamis 1.6mm, après on lave le refus au tamis 1.6mm, enfin on le place dans un étuve à 105c pour qu'il soit sécher, après 24h on fait peser. Soit m' le résultat de la pesée.

$$LA = [(5000 - m') / 5000] * 100$$

Le tableau suivant récapitule les résultats de Los Angeles pour les deux graviers

Tableau 9: Essai de Los Angeles des graviers étudié

| Matériaux | Classes granulaires | Poids | | | LA = 100 × — |
|-----------|---------------------|-------------|------------|--------------------------|--------------|
| | | Initial (M) | Final (m') | < 1.6mm m = 5000 - m' | |
| 3/8 | 4-6.3 | 5000 | 3535 | 1465 | 29.3 |
| 8/15 | 10-14 | 5000 | 3635 | 1365 | 27.3 |

LA ≤ 30 Donc nos gravillons résistent aux chocs.

I.2.1-4 Détermination des masses volumiques des granulats

I.2.1-4-1 Détermination de masse volumique apparente «P_p»

La masse volumique apparente est déterminée convenablement à la norme NF P 18-554.

On appelle masse volumique apparente ; la masse de l'unité de volume du matériau en vrac, c'est à dire vides compris.

❖ Conduite de l'essai

➤ Après quartage de l'échantillon, on le prend entre deux mains formant un entonnoir. On place les deux mains à 10 cm environ au-dessus du récipient. Laisser tomber le matériau, ni trop vite, ni trop lentement, en le disposant sans tassement par couches horizontales successives. Verser ainsi le matériau, toujours au centre du récipient jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône. Araser la couche supérieure du granulat à l'aide d'une réglette. Peser le contenu (figure 29), soit M' .

L'opération est effectuée trois fois pour chaque échantillon. On calcul alors la masse volumique apparente de l'échantillon « P_p » par la relation suivante : $P_p = (M' - M) / V_r$ telle que :

I- Procédure expérimentale

M' : masse du récipient+échantillon.

M : masse du récipient vide. $M=485g$.

V_r : volume du récipient. $V_r=1020 \text{ cm}^3$

Les résultats obtenus pour les trios échantillons sont présentés dans le tableau (10)

Tableau 10: Masses volumiques apparentes des granulats.

| Echantillon | M' (g) | | $M' - M$ (g) | pp (g/cm^3) | pp moyenne (g/cm^3) |
|-------------|----------|------|--------------|------------------------|--------------------------------|
| 0/3 | 1 | 1882 | 1397 | 1.369 | 1.369 |
| | 2 | 1879 | 1394 | 1.366 | |
| | 3 | 1887 | 1402 | 1.374 | |
| 3/8 | 1 | 1880 | 1395 | 1.367 | 1.367 |
| | 2 | 1875 | 1390 | 1.362 | |
| | 3 | 1885 | 1400 | 1.372 | |
| 8/15 | 1 | 1890 | 1405 | 1.373 | 1.384 |
| | 2 | 1900 | 1415 | 1.387 | |
| | 3 | 1905 | 1420 | 1.392 | |

I.2.1-4-2 Masse volumique absolue « p_s »

La masse volumique absolue est déterminée convenablement à la norme NF P 18-554.

La masse volumique absolue « P_s » est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

❖ Méthode de l'éprouvette graduée

➤ Conduite de l'essai

Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 . Peser un échantillon sec de granulat de masse

M (300g), et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toute les boules d'air (figure 28).

Le niveau monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 . La masse volumique absolue est alors :

$$P_s = M / (V_2 - V_1)$$

I- Procédure expérimentale

Les résultats obtenus pour les trios échantillons sont présentés dans le tableau (11):

Tableau 11: Les masses volumiques absolues des granulats

| Echantillon | V1 (ml) | V2 (ml) | Ps (g/ml) | Ps moyenne (g/ml) |
|-------------|---------|---------|-----------|-------------------|
| 0/3 | 1 | 600 | 710 | 2.72 |
| | 2 | 600 | 705 | 2.85 |
| | 3 | 600 | 708 | 2.77 |
| 3/8 | 1 | 600 | 710 | 2.72 |
| | 2 | 600 | 710 | 2.72 |
| | 3 | 600 | 711 | 2.70 |
| 8/15 | 1 | 600 | 700 | 3 |
| | 2 | 600 | 710 | 2.72 |
| | 3 | 600 | 710 | 2.72 |



Absolue

Apparente

Figure 28: Détermination des masses volumiques des granulats

I.2.1-5 Essai d'équivalent de sable

Dans le but d'évaluer la propreté de sable utilisé ; on effectue l'essai d'équivalent de sable en suivant la norme NF P 18-597. L'essai est effectué sur un sable, qui consiste à introduire une quantité défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante, après agitation laissé décanter le mélange pendant 20 mn, ensuite mesurer les hauteurs.

❖ Matériel utilisé

- Eprouvette en plexiglas, avec deux traits de repères, et leur bouchon.
- Entonnoir pour introduire le sable.
- Bonbonne de 5L pour la solution lavante avec son bouchon, le siphon et tube souple de 1.50 m.
- Machine agitatrice électrique.
- Règle métallique pour la mesure des hauteurs de sable et floculat.
- Piston taré, dans la masse coulissante est de 1000g.

❖ Conduite de l'essai :

Remplir les éprouvettes avec la solution lavante jusqu'au premier trait. Verser la quantité de sable en veillant à éliminer les bulles d'air, laisser reposer 10 mn. Boucher les éprouvettes, et les agiter de manière automatique par la machine.

Laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur ; pour cela : rincer le bouchon au-dessus de l'éprouvette, faire descendre le tube laveur ; laver ainsi les parois intérieures de l'éprouvette, laver le sable en faisant, descendre et remonter lentement le tube laveur, sortir le tube laveur (et fermer le robinet) lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur.

Laisser reposer 20 mn en évitant toute vibration, mesurer à vue les hauteurs h_1 et h_2 , descendre lentement le piston taré dans le liquide à travers le floculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette, et l'immobiliser au contact du sable. Mesurer h_1 .

Recommencer les mêmes opérations 3 fois et calculer l'équivalent de sable (ES) moyen.

$$ESV = 100 \times \frac{h_1}{h_2} ; \quad ESP = 100 \times \frac{h_1}{h_2}$$

I- Procédure expérimentale

La figure 29 explique le mode d'opérateur de l'essai d'équivalent de sable

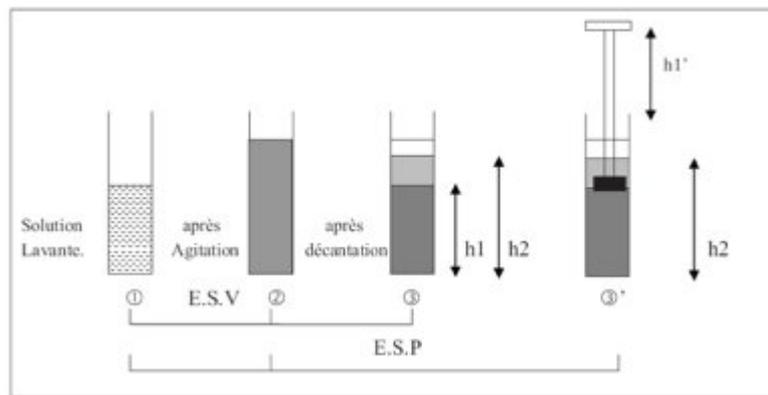


Figure 29: Essai d'équivalent de sable

Les résultats de l'équivalent de sable sont donnés dans les tableaux suivants :

Tableau 12: Résultats de l'essai d'équivalent de sable.

| Eprouvette | h_1 (cm) | h_2 (cm) | h_1' (cm) | ESV (%) | ESP (%) |
|---------------------|------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| 1 | 8.4 | 13.5 | 7.74 | 62.22 | 55.33 |
| 2 | 7.8 | 12.2 | 7.79 | 63.9 | 63.85 |
| 3 | 8.3 | 12 | 8 | 69.16 | 66.66 |
| ES moyen (%) | | | | 65.09 | 61.94 |

On a : $65 \leq \text{ESV} \leq 75$ et $60 \leq \text{ESP} \leq 70$ le sable étudié contient de fines, d'où il peut être utilisé pour formuler les BAP.

I.2-2 Les fines

I.2.2-1 Essai de prise

L'essai de prise est déterminé convenablement à la norme EN 196-3 ; l'objectif de l'essai est de déterminer le temps de début et de fin de prise d'un ciment.

❖ Principe de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée ; l'appareil utilisé est appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13 mm de diamètre, quand sous l'effet d'une charge de 300g, l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que ; $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

On dit que le début de prise est atteint, ce moment, mesuré à partir du début de malaxage, est appelé « temps de début de prise ».

Le « temps de fin de prise » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5 mm.

I- Procédure expérimentale

❖ Equipement nécessaire

-L'essai doit se dérouler dans une salle dont la température est de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et dont l'humidité relative soit supérieure à 90%.

-un appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.33mm.

-Un moule tronconique de 40 mm de hauteur et de 70 à 80 mm de diamètre, avec une plaque en verre servant à supporter le moule.

-Une balance permet de peser à 1g près.

-Une truelle.

-Un chronomètre.

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de ciment avec différents taux de substitution d'argile cuite broyée (ACB à : 0, 5, 10, et 15%). Et on a pris $E/C=0.35$.

Les résultats de l'essai trouvés sont donnés dans le tableau ci-contre.

Tableau 13: début et fin de prise des différentes pâtes de ciment

| Pâtes (% ACB) | Ciment (g) | ACB (g) | Eau (g) | Début de prise (h : mn) | Fin de prise (h : mn) |
|---------------|------------|---------|---------|-------------------------|-----------------------|
| 0 | 400 | 0 | 140 | 2 : 23 | 4 : 09 |
| 5 | 380 | 20 | 133 | 1 : 35 | 3 : 55 |
| 10 | 360 | 40 | 126 | 1 : 10 | 3 : 39 |
| 15 | 340 | 60 | 119 | 00 : 56 | 3 : 30 |

La figure 30 représente l'essai de prise effectué pour le ciment



Figure 30: Appareil de Vicat

I.2.2-3 Les additions minérales

Deux types d'addition ont été utilisés : une addition minérale active (ACB) et une addition inerte (fillers). On donne dans le tableau (17) la composition chimique des additions utilisées.

Tableau 17: La composition chimique des ajouts utilisés

| Pourcentage en masse des constituants (%) | Argile cuite broyée (ACB) | Filler calcaire |
|---|---------------------------|-----------------|
| SiO ₂ | 46.80 | 0.50 |
| Al ₂ O ₃ | 13.90 | 0.00 |
| Fe ₂ O ₃ | 5.10 | 0.00 |
| CaO | 16.50 | 54.84 |
| MgO | 2.40 | 0.10 |
| SO ₃ | 1.10 | 0.60 |
| K ₂ O | 2.10 | 0.10 |
| Na ₂ O | 1.12 | 0.02 |
| TiO ₂ | 0.47 | - |
| MnO | 0.03 | - |
| S | 0.09 | - |
| fr.CaO | 0.00 | - |
| wl.CaO | 0.96 | - |
| wl.MgO | 0.00 | - |
| wl.K ₂ O | 0.04 | - |
| wl.Na ₂ O | 0.09 | - |
| wl.SO ₃ | 0.09 | - |
| Tv.100C | 0.10 | - |
| Gv.1000C | 9.60 | - |

Avec :

fr : libre.

wl : dissolution dans l'eau.

Tv.100C : disparition des matières organique à la température de 100 °C.

Gv.1000C : disparition des matières organique à la température de 1000 °C.

I.2.2-4 L'analyse sédimentométrique des fines

L'objet de l'analyse sédimentométrique des fines particules est la détermination de la distribution pondérale de la taille de ces particules. Cette analyse se fait en suivant la norme NF P 94-057. Cette norme s'applique aux éléments d'un sol naturel passant à travers le tamis à maille carrée de 80µm d'ouverture.

I- Procédure expérimentale

Cet essai utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins à très fins est fonction de leur dimension. La loi de Stokes donne, dans le cas de grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules.

La loi de Stokes est donnée par la relation suivante :

$$V = g \times \frac{d^2}{18 \mu} \times (\rho_s - \rho_0)$$

V : Vitesse de décantation de la particule (cm/s).

g : Accélération de la pesanteur (cm/s²).

ρ_s : Poids spécifique de la particule (KN/m³).

ρ_0 : Poids spécifique du liquide de décantation (KN/m³).

μ : Viscosité du liquide de décantation (poise = 1g/cm/s).

d : Diamètre de la particule (cm).

L'eau et les fines ayant passé au tamis de 80 μ m sont recueillies et après décantation et passage à l'étuve jusqu'à dessiccation complète, le matériau est désagrégé. Ensuite, 80 g de sol qui est mis en inhibition pendant 12 à 15 heures dans une solution de 500 cm³ d'eau distillée additionnée à 60 cm³ d'une solution défloculante d'hyxamétaphosphate de sodium à 5%. L'ensemble est mis à une agitation mécanique de 10000 à 12000 tr/min pendant 3 minutes afin de bien séparer les grains. La suspension ainsi préparée est versée dans une éprouvette de 2 litres et complétée jusqu'au remplissage d'eau distillée. La suspension est ensuite agitée manuellement et après juste la fin de l'agitation, le chronomètre est déclenché, c'est le début de la sédimentation. Des mesures au densimètre sont effectuées à : 30s, 1mn, 2mn, 5mn, 10mn, 20mn, 30mn, 1h, 4h et 24h.

L'Analyse sédimentométrique des fines sont regroupés dans le tableau 18 ci-après

Tableau 18 : L'analyse sédimentométrique des fines

| Diamètre (μ m) | Passants (%) | | |
|---------------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Ciment CEM | Filler calcaire | Argile (ACB) |
| 80 | 100 | 100 | 100 |
| 77 | 98 | 86 | 88 |
| 55 | 94 | 82 | 84 |
| 38 | 82 | 72 | 80 |
| 25 | 62 | 62 | 70 |
| 17 | 22 | 50 | 64 |
| 12 | 3 | 38 | 58 |

I- Procédure expérimentale

| | | | |
|-----|---|-----|----|
| 9 | 3 | 26 | 48 |
| 7 | 3 | 20 | 43 |
| 3.9 | 2 | 4 | 33 |
| 1 | 2 | 0.8 | 19 |
| 0.1 | 0 | 0 | 0 |

Les courbes l'analyse sédimentométrique des fines utilisées dans ce travail sont représentées dans la figure 31

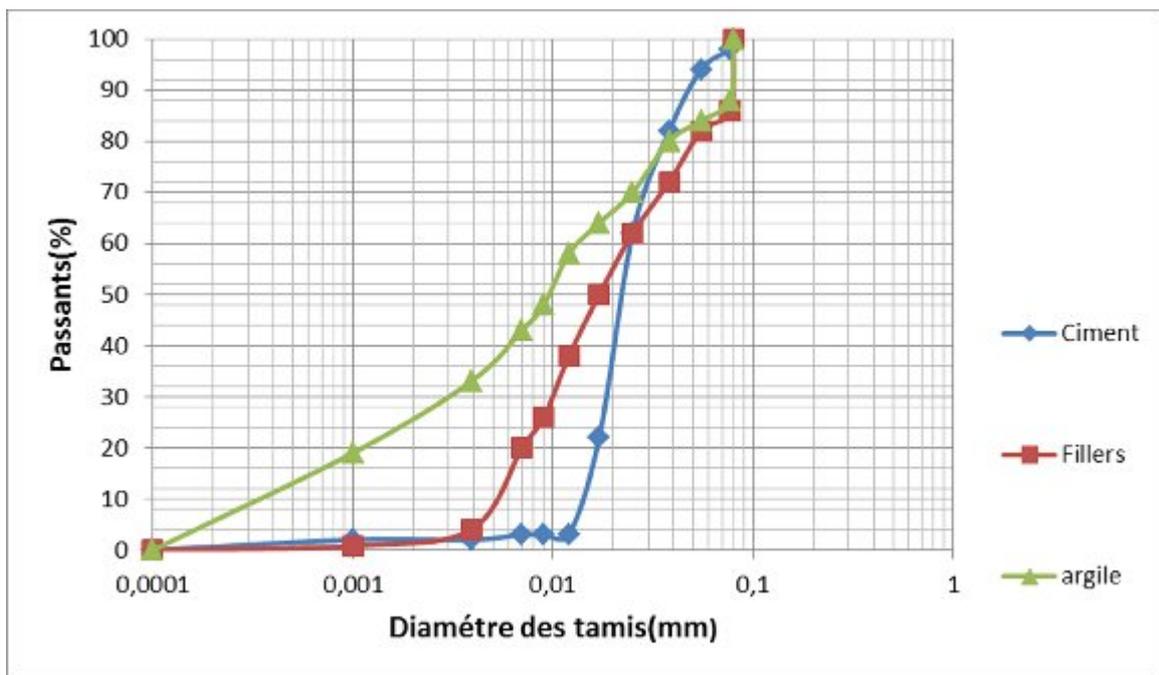


Figure 31 : Courbe d'analyse sédimentométrique

II.1 Introduction

Ce chapitre présente d'abord la méthode utilisée pour la formulation du BAP, Nous exposons ensuite les différents essais mis en œuvre pour la caractérisation des propriétés à l'état frais et à l'état durci de ce BAP .Les essais effectués sont dictés par recommandations d'AFGC [2].

II.2 Formulation de BAP

Pour la formulation du BAP 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 [7], [10], [26]. Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1m^3 de béton en ayant comme données les paramètres suivants :

- ❖ Un rapport G/S proche pour favoriser la maniabilité du béton proche de 1.
- ❖ Un rapport E/C =0.53, cette valeur est posé fixe Pour pouvoir tirer des conclusions sur l'effet de l'emploi d'ACB sur les BAP.
- ❖ Un dosage en ciment plutôt élevé, celui-ci est pose égale à 450 Kg/m^3 , ce dosage assure à la fois une bonne résistance mécanique et un dosage en fines élevée.
- ❖ Le volume de la pâte est $400 \text{ L/m}^3(\text{C}+\text{F})$
- ❖ Un pourcentage en superplastifiant est déterminé de façon à limiter la ségrégation et obtenir un écoulement compris entre 55cm et 850 selon AFGC. Ce dosage est démontré d'après la fiche technique accompagnant le produit utilisé, le dosage conseillé est 0.5% à 2%.
- ❖ Le dosage en fillers calcaires est utilisé avec une quantité de 100 Kg/m^3 , il peut être changé si le dosage du ciment change. Le rapport E/F est de 0.45, valeur optimum qui assure un béton résistant et stable [6].
- ❖ La quantité d'eau utilisée est déterminée par le rapport E/C.
- ❖ Dosage des granulats (sable, gravier «3/8,8/15 ») est calculer par la relation : $G+S+E+C+A=1000$ le volume de sable est 40% de la masse de ciment. Cette quantité limite le blocage du BAP dans les milieux fortement ferraillés. Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser **50%** de **8/15** et **50%** du **3/8**.

On obtient la formulation décrite dans le (tableau 19) :

Tableau 19: Composantes du béton autoplaçant (dosage pour 1m³ du béton)

| Composantes | Dosage en masse (Kg/m ³) |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Ciment | 450 |
| Sable 0/3 | 715 |
| G 3/8 | 387 |
| G 8/15 | 387 |
| Fillers calcaires | 100 |
| Eau | 239,6 |
| G/S | 1,08 |
| E/C | 0,53 |
| SP 1,33% du poids du ciment | 5,985 |

Notre formulation est une amélioration de celle utilisé par Chaouche.L [10]. Nous avons gardé les mêmes quantités des matériaux utilisés sauf que le ciment utilisé (CEM II/B) diffère de celui utilisé dans la recherche sus-cité, où un ciment CEM I a été utilisé.

Cette modification s'est faite afin d'avoir un BAP plus économique et moins polluant. En effet, la production d'un CEM I nécessite 95% du clinker par contre le CEM II/B nécessite que 65% c'est à dire un gain en cout du béton.

II.2.1 Formulation de BAP sans addition d'ACB (0%)

❖ Dimension des moules

Les moules utilisés sont de formes cylindriques et répondent à la norme NF P 18-400 de dimensions **16*32 cm²** et volume **V=6.43*10⁻³m³**, ils doivent être préparé avant l'utilisation.

Le calcul des masses de ces composantes seront déterminé pour un volume d'un seul cylindre puis elles seront multipliées par le nombre totale des moules pour chaque catégorie du béton.

II-Formulation et Essais de caractérisations

❖ Détermination de la masse de chaque constituant

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 20

Tableau 20: La composition de BAP Sans ACB (0%)

| Les composantes | Dosage 1m ³ (Kg /m ³) | Masse d'une éprouvette(Kg) |
|-------------------------------|--|----------------------------|
| Ciment | 450 | 2.89 |
| Sable 0/3 | 715 | 4.59 |
| G 3/8 | 387 | 2.48 |
| G 8/15 | 387 | 2.48 |
| Fillers calcaires | 100 | 0.643 |
| Eau | 239.6 | 1.54 |
| SP 1.33% de la masse C | 5.985 | 0.038 |

II.2.2 Formulation avec addition en ACB

Pour formuler un BAP avec un minéral on utilise la même formulation que pour un BAP sans ajout en ACB, mais vue l'importance de la quantité 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 ACB, dosages pris selon les quantités :

- **0% en ACB****BAP I**, béton témoin
- **5% en ACB**.....**BAP II**,
- **10% en ACB**.....**BAP III**,
- **15% en ACB**.....**BAP IV**.

Pour chaque dosage en ACB, on doit calculer le nouveau dosage en ciment, eau et en superplastifiant

Le tableau 21 regroupe la composition de toutes les gâchées, les masses représentées sont celles de 04 éprouvettes.

Tableau 21: Récapitulatif de la composition des gâchées préparées

| Les BAP | Ciment(Kg) | ACB(Kg) | Eau(Kg) | Sp(Kg) | Fc (Kg) | Sable 0/3(Kg) | G 8/15(Kg) | G3/8(Kg) | E/C |
|----------------|------------|---------|---------|--------|---------|---------------|------------|----------|------|
| BAP I | 11.56 | 0 | 6.16 | 0.152 | 2.57 | 18.36 | 9.92 | 9.92 | 0.53 |
| BAP II | 10.99 | 0.57 | 5.82 | 0.174 | 2.57 | 18.36 | 9.92 | 9.92 | 0.53 |
| BAP III | 10.41 | 1.156 | 5.52 | 0.195 | 2.57 | 18.36 | 9.92 | 9.92 | 0.53 |
| BAP IV | 9.82 | 1.736 | 5.20 | 0.2155 | 2.57 | 18.36 | 9.92 | 9.92 | 0.53 |

La quantité de superplastifiant ajoutée est en fonction de taux ajout en ACB.

II.2.3 Préparation des gâchées

La préparation du BAP 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 120 litre de volume.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant, les étapes qui se suivent sont:

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement dans l'étuve.
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Introduire les matériaux secs dans le malaxeur (gravier, sable et le ciment) malaxé pendant 2min. Pendant ce temps-là et le malaxeur en marche, on introduit les fillers calcaires.
- Pesé la quantité d'eau nécessaire ajouter à la moitié le superplastifiant, laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant) malaxer 1 min encore.
- Ajouter la deuxième moitié d'eau graduellement et malaxer pendant 5min. Laisser le mélange reposé.
- Effectuer immédiatement les essais après.
- Après avoir effectué tous les essais de caractérisations, on remplit les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration.

Nous avons réalisé 4 gâchées. Pour chaque gâchée, nous avons 03 éprouvettes ainsi, nous avons obtenus :

- 03 éprouvettes de BAP contenant 0% d'ACB ;
- 03 éprouvettes de BAP contenant 5% d'ACB ;
- 03 éprouvettes de BAP contenant 10% d'ACB ;
- 03 éprouvettes de BAP contenant 15% d'ACB.

II.2.4 Conservation des éprouvettes

Après le gâchage, 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, ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment.

II.3 Essais sur BAP

Les essais effectués sur les bétons permettent de caractériser leurs performances physiques et mécaniques, de conclure sur leurs nature. Les modes opératoires de ces essais sont détaillés en partie théorique.

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

- Essai de consistance
- La capacité de remplissage (essai boîte en L)
- Essai de ségrégation statique
- La teneur en air
- La résistance à la compression

II.3.1 Essais sur béton frais

II.3.1.1 Essais de consistance

L'essai de consistance est déterminé par l'essai d'étalement au cône d'Abrams. Cet essai permet de mesurer la mobilité du béton en milieu non confiné. Il consiste à mesurer le diamètre d'une galette de béton après soulèvement du cône .Les résultats obtenues sont résumer dans le tableau 22.

II.3.1.2 La capacité de remplissage

La capacité de remplissage est mesurée par l'essai de la boîte en L. 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, H_2/H_1 doit être supérieur à 0,8.Les résultats sont donnes dans le tableau 22.

II-Formulation et Essais de caractérisations

II.3.1.3 Essai ségrégation statique

La résistance à la ségrégation des BAP est interprétée à l'aide d'essai de 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), 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 ne considère qu'une valeur inférieure à 15 % de laitance est caractéristique d'un béton stable.

Le tableau 22 récapitule les essais effectués sur les bétons frais ainsi que les résultats obtenus.

Tableau 22 : Récapitulation des essais sur le béton frais

| Catégorie des BAP | Etalement | | | L-BOX | | | Stabilité de tamis | | |
|------------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|---|----------------------|--------------------------------------|---|--|------|
| | D ₁ cm | D ₂ cm | D _{moy} Cm | H ₁ cm | H ₂ cm | H ₂ /H ₁ Cm | Poids de l'échantillon M _{ech} (Kg) | Poids de laitance M _l (Kg) | π(%) |
| BAP I | 59 | 61 | 60 | 11 | 9.5 | 0.86 | 4.85 | 0.330 | 6.80 |
| BAP II | 62 | 64 | 63 | 10.6 | 9.4 | 0.89 | 4.905 | 0.436 | 7.60 |
| BAP III | 63 | 66 | 64.5 | 9 | 8.2 | 0.91 | 4.8 | 0.399 | 8.31 |
| BAP IV | 40 | 43 | 41.5 | 12 | 9.9 | 0.82 | 4.98 | 0.232 | 4.64 |
| Recommandation d'AFGC | 55cm ≤ D ≤ 85cm | | | 0.80 ≤ H₂/H₁ ≤ 1 | | | π ≤ 15% | | |

La figure 32 représente l'ensemble d'essais effectués au béton frais



Figure 32 : L'ensemble des essais effectués sur le béton frais

II-Formulation et Essais de caractérisations

II.3.1.4 La teneur en air

Elle est mesurée par un aéromètre qui permet de donner le pourcentage des vides contenu dans le béton selon la norme NF P18-443. La conduite de cet essai est comme suit:

- Remplir le récipient de l'aéromètre du béton jusqu'au débordement puis araser la couche débordante ;
- Nettoyer les bords du récipient à l'aide d'un chiffon humide, placer le couvercle et le fermer bien avec soin ;
- Remplir le tube de couvercle avec l'eau jusqu'au niveau « 0 » ;
- Appliquer une pression de 1 bars avec une pompe à mains, puis lire la valeur sur la règle. la valeur de la lecture est déterminée en pourcentage.

Les résultats obtenus lors de cet essai sont énumérés dans le Tableau 23

Tableau 23 : Teneurs en air des BAP

| Catégorie des BAP | Teneur en air % |
|-------------------|-----------------|
| BAP I | 2.1 |
| BAP II | 2.1 |
| BAP III | 2 |
| BAP IV | 2.3 |

❖ Masse volumique fraîche des bétons

La masse volumique fraîche des bétons est déterminé en suivant la norme NF P 18-440 par la relation suivante :

$$M_{VF} = M_p - M_v / V$$

M_p : Masse de l'éprouvette pleine du béton.

M_v : Masse de l'éprouvette vide.

V : volume d'une éprouvette $V=6.43 \cdot 10^{-3} m^3$

Les masses volumiques fraîches des bétons données par le tableau 24 est moyenne arithmétique de les 03 éprouvettes de chaque séries définis précédemment (II.2.3)

Tableau 24: Les masses volumiques moyennes fraîches

| Bétons | BAP I | BAP II | BAP III | BAP IV |
|------------------|---------|---------|---------|---------|
| $M_{vf}(Kg/m^3)$ | 2325.24 | 2319.54 | 2324.93 | 2346.81 |

II-Formulation et Essais de caractérisations

Les résultats des masses fraîches de toutes les éprouvettes confectionnées sont synthétisés dans l'annexe A.

II.3.2 Essais sur le béton durci

II.3.2.1 Masse volumique durcie des bétons

Les masses des bétons sont déterminées en suivant la norme NF P 18 -440 .Elles sont mesurées aux âges de 1,7, 14, 21,28 jours, la détermination est simple, il suffit de peser les éprouvettes de chaque série du béton puis prendre la moyenne des trois .La masse volumique est donné par l'expression suivant :

$$M_{vd} = M/V$$

Avec :

M : masse du béton durci

V : volume de l'éprouvette tel que $V = 6.43 * 10^{-3} m^3$.

Toutes les mesures effectuées aux différents âges sont donnés dans l'annexe A

Tableau 25: Les masses volumiques moyennes des bétons durci

| Les masses volumiques moyennes des bétons durcis (Kg/m ³) | | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| âges | BAP I (00% en ACB) | BAP II (5% en ACB) | BAP III (10% en ACB) | BAP IV (15% en ACB) |
| 24heures | 2309.8 | 2307.41 | 2315.08 | 2337.48 |
| 07 jours | 2325.14 | 2322.34 | 2328.66 | 2351.16 |
| 14 jours | 2328.46 | 2325.66 | 2331.88 | 2355.00 |
| 21 jours | 2331.16 | 2329.08 | 2335.19 | 2358.42 |
| 28 jours | 2332.81 | 2330.01 | 2336 .02 | 2359.46 |

II.3.2.2 Essai de compression

L'essai de compression (figure 33) consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette suivant la norme NF P 18-455.On note la charge maximale atteinte **P** (MN) et la surface de chargement **S** (m²).

La contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

$$f_{c28} = P / S$$

P : charge de rupture ;

S : la surface de chargement ;

f_{c28}: résistance à la compression à **28** jours en **(MPa)**

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



Figure 33 : Essai de compression

Les essais sont effectués sur les différents bétons à l'âge de 28 jours. Pour toutes les différents BAP, la résistance mécanique donnée dans le tableau 25 a été calculée par la moyenne arithmétique des résistances d'une série de trois éprouvettes voir l'Annexe B

Tableau 26: Résistance à la compression des différents bétons

| Bétons | BAP I (0%) | BAP II (5%) | BAP III (10%) | BAP IV (15%) |
|------------------------|------------|-------------|---------------|--------------|
| f _{c28} (MPa) | 24 .2 | 28.23 | 23.96 | 23.5 |

III.1 Introduction

La troisième et dernière partie de ce travail a pour objectif d'analyser les résultats obtenus dans la **partie II**. Nous donnons une interprétation des résultats.

III.2 La consistance

III.2.1 Effet du superplastifiant

D'après les essais d'étalements effectués au cône d'Abrams, on constate que pour le BAP I (0% ACB) la valeur de l'étalement est de 60 cm. Cette valeur est inférieure à celles données par les autres bétons (BAP II, BAP III). Ceci peut s'expliquer par l'augmentation du dosage en Sp pour l'obtention de la fluidité désirée. En revanche le BAP IV, atteint un écoulement de 41.5 cm. Cela peut s'expliquer par le taux d'ACB ajouté à ce béton. En effet, l'ACB ayant une surface Blaine ($9140 \text{ cm}^2/\text{g}$) supérieure à celle du ciment, sa demande en eau (pour l'hydratation) est très grande.

L'augmentation du dosage en Sp a permis une plus grande défloculation des grains de ciment.

Ces résultats peuvent être décrits sous forme d'un histogramme (figure 34) qui donne l'effet du superplastifiant sur les bétons autoplaçants.

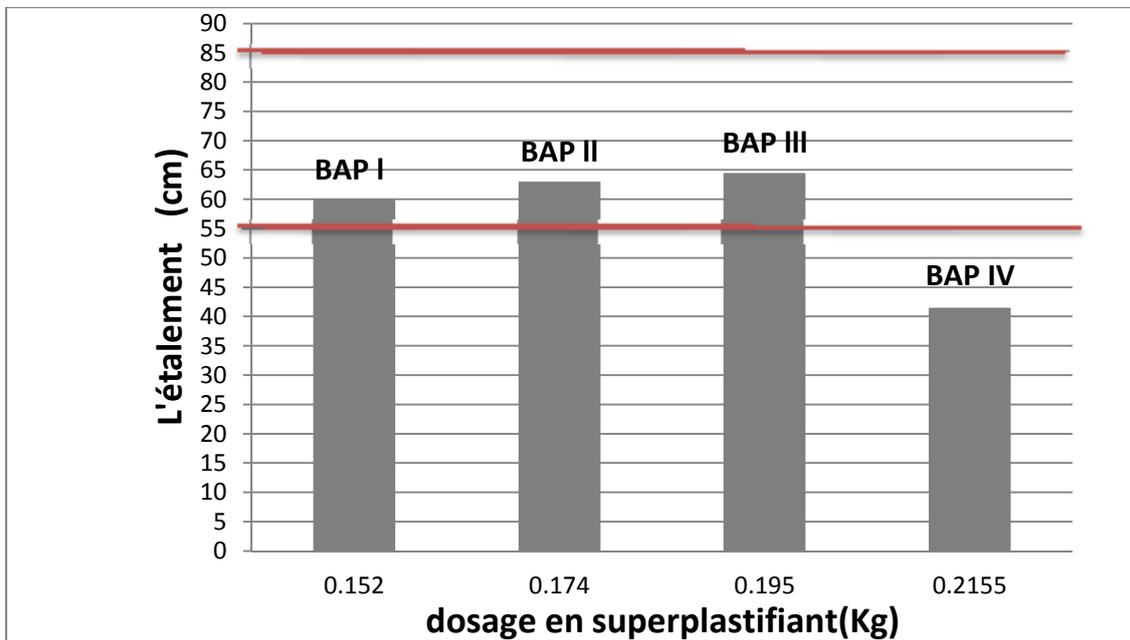


Figure 34 : Influence de dosage en superplastifiant sur la consistance

III.2.2 L'effet de dosage en ACB

L'ACB est une poudre ultrafine qui se caractérise par une grande surface spécifique ($9140 \text{ cm}^2/\text{g}$) elle est 03 fois plus fine que le ciment. Sa présence dans le béton à fort dosage augmente la demande en

III - Interprétation et Discussion des résultats

eau. Pour pouvoir maintenir un bon étalement, il est nécessaire d'augmenter la quantité d'eau présente dans le mélange ou du dosage en Sp.

La présence d'ACB dans les bétons (BAP II, BAP III, BAP IV) a nécessité l'augmentation de dosage en superplastifiant, lors de fabrication des bétons on a constaté que la quantité du superplastifiant croit avec le dosage en ACB, ce qui influence l'étalement des bétons. En effet dans le BAP IV qu'est avec un taux d'ACB de 15% l'étalement a subi une chute de 23 cm. On peut expliquer ce phénomène par le fait que : l'ACB incorporée à petite 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 en SP limité, il peut causer une perte de la fluidité, à cause de la forte demande en eau de l'ACB.

Cette influence de dosage en ACB est figurée dans l'histogramme de la figure 34.

III.3 La ségrégation dynamique

Sur la ségrégation dynamique des BAP, les résultats représentés sur la figure 36 sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton autoplacant. Cependant, le plus important dans cet essai est que les bétons testés s'écoulent à travers les armatures correctement. Sur ce point, aucun problème n'est à signaler puisque tous les BAP présentent des taux de remplissage supérieur à 0,80.

La figure 35 représente la capacité de remplissage des BAP

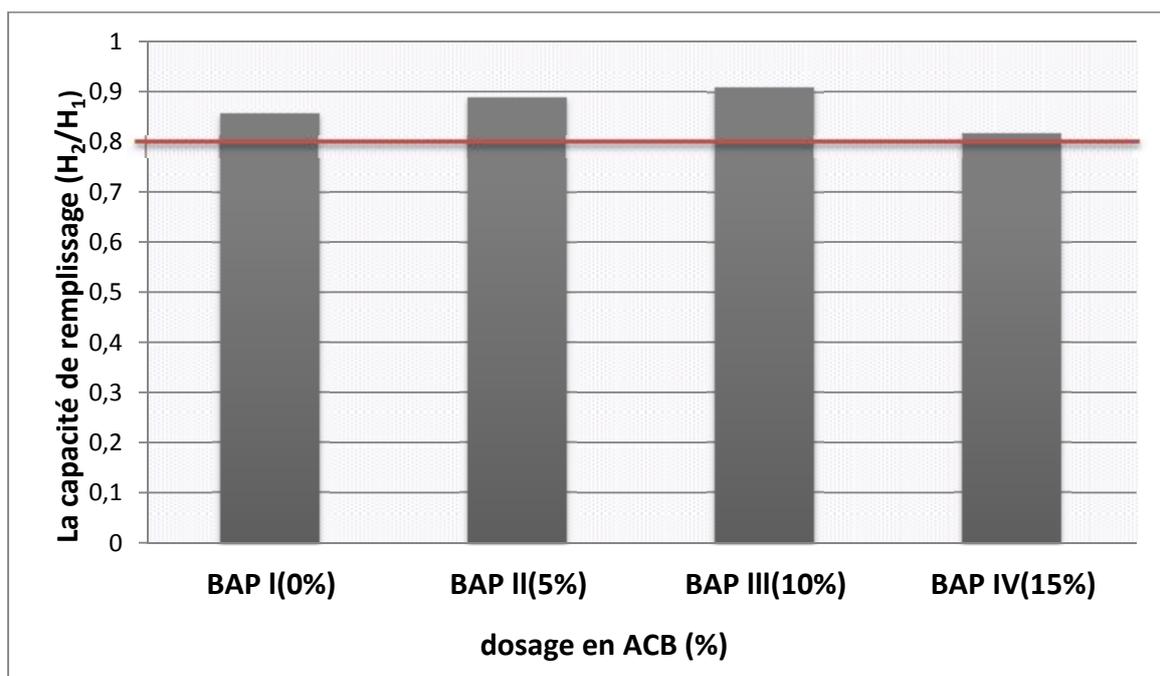


Figure 35: La ségrégation dynamique des bétons (Boite en L)

III - Interprétation et Discussion des résultats

On remarque que le rapport H_2/H_1 augmente avec l'augmentation d'ACB. Pour le BAP IV ce rapport diminue mais reste supérieur à 0.80, qu'est la limite donnée par les recommandations de l'AFGC ceci peut s'expliquer par l'ACB incorporée à petite dosage augmente le volume de pâte dans le béton.

Le BAP III dosé à 10% d'ACB se caractérise par une bonne fluidité, mais aussi par une bonne capacité au remplissage qui est assurée par l'action combinée du superplastifiant et de l'argile cuite et broyée.

Contrairement au BAP IV qui, par surdosage en fines a perdu sa fluidité, sa grande stabilité le rendant plus visqueux et limite sa capacité au remplissage.

Tous les bétons formulés ne subissent aucune ségrégation durant leur écoulement et aucun risque de blocage dans les milieux confinés.

III.4 La ségrégation statique

Les essais sur la ségrégation statique sont présentés sur l'histogramme de la figure 36.

Sur la ségrégation statique, tous les BAP ont un taux de ségrégation inférieur à 15 %, synonyme d'une stabilité correcte selon les recommandations de l'AFGC. Ces résultats permettent de qualifier les BAP I, II, III et IV comme étant des bétons stables, le pourcentage de laitance étant inférieur à 15% pour les quatre bétons. Cette stabilité est assurée d'une part, par l'importante quantité de mortier (liant) que contient le BAP et d'autre part, par l'ajout de superplastifiant incorporé lors de sa fabrication.

La croissance considérable du volume de pâte par ajout d'ACB améliore largement la stabilité : on note une stabilité de 8.31 pour le BAP III contre une stabilité de 6.80 pour un béton qui ne contient pas d'ACB

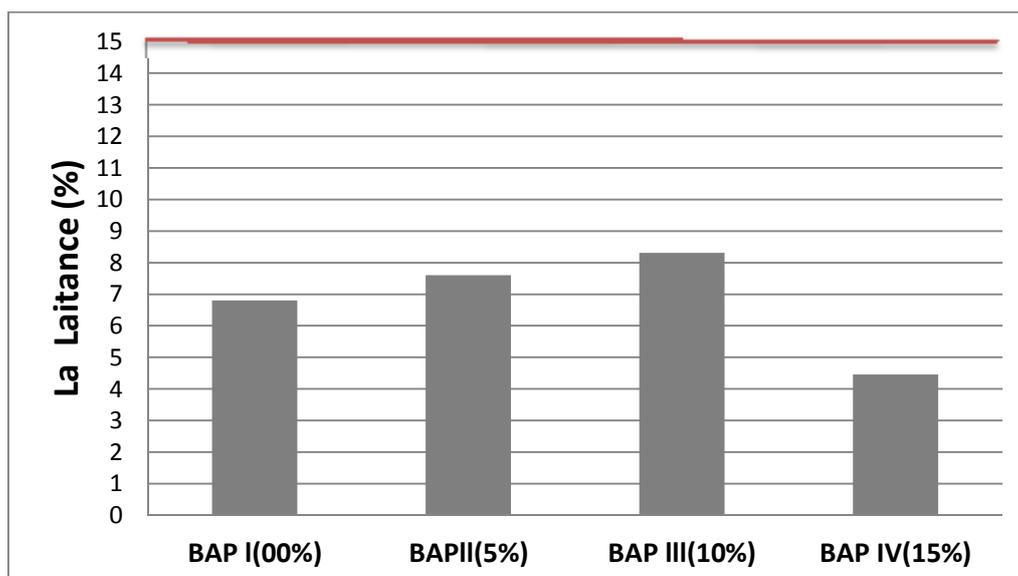


Figure 36 : Résistance à la ségrégation statique en fonction de taux d'ajout d'ACB

III.5 Vérification de la ségrégation

Un autre moyen de contrôler la ségrégation d'un BAP consiste à scier une éprouvette de béton durci et observer la répartition des granulats.



Figure 37 : vérification de la ségrégation

Ces photographies illustrent bien le fait que les formulations de béton présentées ici ne sont pas sujettes à la ségrégation (statique et ou dynamique). Les granulats sont en effet régulièrement répartis sur toute la hauteur des échantillons scies.

III.6 Les masses volumiques durci

Les masses volumiques des bétons mesurés aux différents âges sont illustrés sur la figure 38

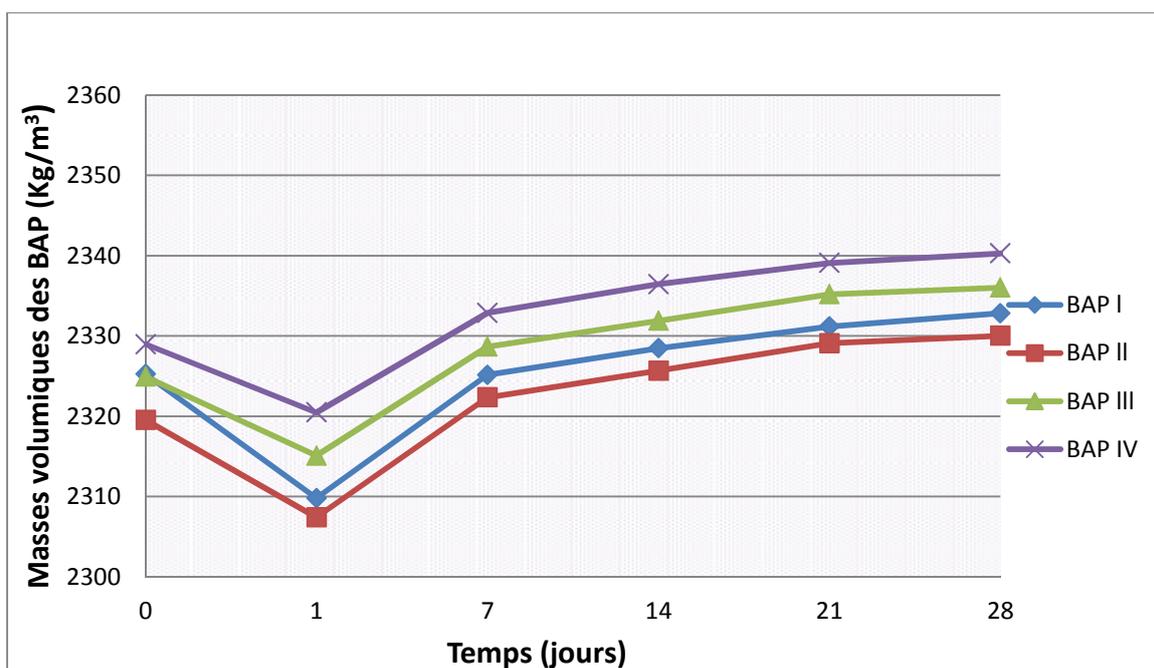


Figure 38 : Evolution des masses volumiques des BAP en fonction du temps

III - Interprétation et Discussion des résultats

La figure 38 montre que les masses volumiques des différents BAP, baissent au 1^{er} jour. Cela résulte de l'évaporation d'eau étant donné que les éprouvettes sont en contact de l'air ambiant.

Les masses volumiques des bétons augmentent à partir 24^{ème} heures .Cela s'explique par l'hydratation continue des éprouvettes, vu qu'elles sont conservées dans l'eau juste après leur démoulage à 24 heures.

III.6 Résistance à la compression

Les résultats des résistances à la compression obtenus sont montrés sur la figure 39

III.6.1 Influence du superplastifiant

La figure 39 montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction du superplastifiant

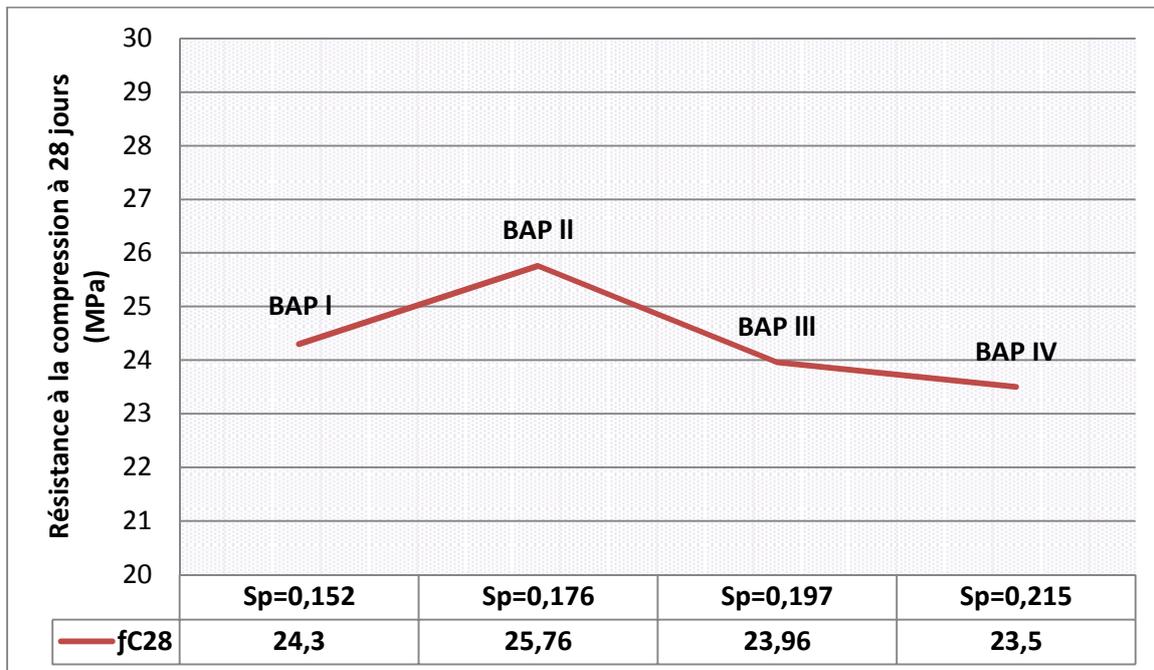


Figure 39 : Influence du superplastifiant sur la résistance à la compression

La mesure de la résistance à la compression à 28 jours de béton BAP II a montré que l'ajout d'un superplastifiant a fait augmenter la résistance à la compression .Cette augmentation peut s'expliquer par le fait que la présence de ce type d'adjuvant diminue la quantité d'eau de gâchage, et donc augmente la compacité des bétons.

Bien entendu ces performances sont d'autant meilleures jusqu'à une certaine limite ce qui est confirmé par les BAP III et BAP IV pour lesquels la résistance a diminuée par l'augmentation du superplastifiant.

Ceci peut s'expliquer par l'augmentation du taux d'ACB dans la BAP III et BAP IV qui a une forte demande en eau vu sa surface spécifique.

III.6.2 Influence du taux d'ajout de l'ACB

D'après la figure 39, on constate que la meilleure résistance à la compression est obtenue pour le taux d'ajout de 5% (BAP II). Cela se justifie par le fait qu'on a remplacé une quantité du ciment par une addition minérale active à long terme.

Le BAP II contenant un pourcentage petit en ACB (5%) a amélioré la résistance mécanique à 28 jours de 1.36 MPa par rapport au béton témoin (BAP I) sans ajout d'ACB qui a donné une résistance de 24,3 MPa. Le BAP III quant à lui, contenant 10% d'ACB, a atteint une résistance de 23.96 MPa à 28 jours, cette valeur étant proche de celle donnée par le béton témoin. En ce qui concerne le BAP IV le résultat obtenu ne peut être discuté, car dans une même série du béton, la machine de compression nous a donnée des résultats extrêmement différents (30.3, 15.7, 24.5).

Pour les bétons III et IV, la résistance à la compression diminue par rapport à celles du béton témoin.

Il est à noter que lors de l'essai d'écrasement des éprouvettes la rupture s'est faite même au niveau des granulats ce qui signifie la grande résistance de la pâte.

III.7 Conclusion

D'après les résultats obtenus précédemment, on conclut que les bétons confectionnés ont une bonne résistance à la ségrégation et une grande résistance de la pâte. Néanmoins ces résultats ne sont pas étonnants, l'ACB étant plus qu'un correcteur granulométrique qui réduit la taille des pores capillaires. Mais leur comportement est influencé par différents paramètres. À savoir le dosage en superplastifiant et le taux d'ajout de l'ACB.

Conclusion Générale

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

Les BAP sont des bétons très fluides, homogènes, et qui se mettent en place sans vibration. Leurs principales propriétés résident dans le fait qu'ils présentent une bonne résistance à la ségrégation avec une grande capacité de remplissage.

Dans le cadre de cette étude, on a considéré une partie d'analyse bibliographique dans laquelle nous avons souligné :

- ✓ La définition des BAP ainsi que leurs composantes ;
- ✓ Leurs propriétés à l'état frais et à l'état durci ;
- ✓ L'influence des additions minérales ;
- ✓ Les différentes approches de formulation.

Ce présent travail a pour but la détermination des caractéristiques des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci formulés avec des matériaux locaux (argile cuite et broyée et fillers calcaires). Nous avons donc formulé quatre bétons avec des taux d'addition d'argile relativement espacés (0%, 5%, 10%, 15%). L'étude des formulations obtenues à l'état frais basée sur les recommandations de l'AFGC (l'étalement, la boîte en L, stabilité au tamis). Mènent aux conclusions suivantes :

- ✓ Il est possible de confectionner un béton autoplaçant à la fois : fluide, stable, homogène et Résistant avec des matériaux locaux et peu coûteux en utilisant des déchets de l'industrie et d'ACB dont la préparation est peu coûteuse par rapport à celle d'un ciment.
- ✓ L'incorporation d'ACB dans la composition d'un BAP améliore la fluidité et la stabilité (évite la ségrégation), ainsi que la résistance à la compression. Son action varie selon son dosage faible ou élevé. Le dosage élevé en ACB nécessite l'utilisation d'un superplastifiant pour maintenir la fluidité et l'ouvrabilité.

Perspectives :

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.

Conclusion Générale

- Le comportement d'un BAP avec agrile broyée et cuite à différentes températures.
- La résistance au feu.
- Résistances à la corrosion et aux chocs.
- L'influence des traitements thermiques sur les caractéristiques et propriétés des BAP.

Mesure des masses des bétons (**Annexe A**)

| BAP | | 0 heures | | 1 jour | 7 jours | 14 jours | 21 jours | 28 jours |
|------------------|---|---------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | M _{bf} (g) | M _{éprouvettes vide} | M _{bd} |
| BAP I (0%) | 1 | 24880 | 9896 | 14884 | 14982 | 15004 | 15024 | 15028 |
| | 2 | 24740 | 9878 | 14766 | 14862 | 14882 | 14904 | 14914 |
| | 3 | 24524 | 9516 | 14906 | 15008 | 15030 | 15050 | 15058 |
| Moyenne | | 2325.24 | | 2309.8 | 2325.14 | 2328.46 | 2331.67 | 2332.81 |
| BAP II (5%) | 1 | 24412 | 9458 | 14868 | 14964 | 14986 | 15006 | 15014 |
| | 2 | 24370 | 9430 | 14866 | 14962 | 14982 | 15006 | 15010 |
| | 3 | 24714 | 9864 | 14776 | 14872 | 14894 | 14916 | 14922 |
| Moyenne | | 2319.54 | | 2307.41 | 2322.34 | 2325.66 | 2329.08 | 2330.01 |
| BAP III (10%) | 1 | 24426 | 9520 | 14842 | 14924 | 14944 | 14966 | 14972 |
| | 2 | 24498 | 9540 | 14896 | 14988 | 15006 | 15028 | 15034 |
| | 3 | 24740 | 9756 | 14920 | 15008 | 15032 | 15052 | 15056 |
| Moyenne | | 2324.93 | | 2315.08 | 2328.66 | 2331.88 | 2335.19 | 2336.02 |
| BAP IV (15%) | 1 | 24498 | 9490 | 14963 | 15010 | 15030 | 15045 | 15050 |
| | 2 | 24538 | 9412 | 14857 | 14987 | 15017 | 15021 | 15031 |
| | 3 | 24566 | 9774 | 14966 | 15004 | 15023 | 15055 | 15063 |
| Moyenne | | 2328.97 | | 2321.72 | 2332.86 | 2336.44 | 2339.08 | 2340.27 |

Mesure des résistances à la compression à 28 jours (**Annexe B**)

| BAP | | Chargement (MN) | f_{c28} (MPa) |
|--------------|---|-----------------|-----------------|
| BAP I (0%) | 1 | 500.09 | 25.5 |
| | 2 | 496.3 | 24.8 |
| | 3 | 445 | 22.8 |
| BAP II(5%) | 1 | 501.85 | 24.96 |
| | 2 | 520.71 | 25.9 |
| | 3 | 531.2 | 26.42 |
| BAP III(10%) | 1 | 480.6 | 24 |
| | 2 | 514.7 | 25.6 |
| | 3 | 447.96 | 22.28 |
| BAP IV | 1 | 607 | 30.3 |
| | 2 | 313.1 | 15.7 |
| | 3 | 492.6 | 24.5 |

Normes

NF P 94-057 : Analyse granulométrique des sols (méthode par sédimentation).

NF EN 196-3 : Norme française. Méthodes d'essais des ciments. Détermination du temps de prise et de la stabilité

SN EN 197-1 : Ciment-partie 1 : composition, spécification et critères de conformité des ciment courants.

SN EN 206-1 Béton- partie 1 : Spécifications, performances, production et conformité.

NF P 18-400 : Norme française qui décrit les dimensions des moules.

NF P 18-404 : Norme française. Essais d'étude, de convenance et de contrôle. Confection et conservation des éprouvettes

NF P 18- 440 : Norme française. Essai pour béton durci. Masse volumique.

NF P 18-443 : Norme française. Essai pour béton frais. Teneur en air – méthode de compressibilité.

SN EN 450, 1994 : Cendres volantes pour béton-définition, exigences et contrôle de qualité.

NF P 18-455 : Norme française. Essai pour béton durci. Résistance à la compression des éprouvettes.

NF P 18-502 : Fumée de silices

NF P 18-506 : Additions pour béton hydraulique, laitier vitrifié moulu à haute fourneau.

NF P 18- 553 : Normalisation française. Granulats. Préparation d'un échantillon pour essai

NF P 18-554 : Normalisation française. Granulats. Mesures des masses volumiques, de la porosité du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux.

NF P 18-573 : Normalisation française. Granulats. Essai Los Angeles.

NF P18-597 : Normalisation française. Granulats. Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines.

Références bibliographiques

- [1] **ADAM.M.NEVILLE** ; propriétés des bétons, traduit par le CRIB, édition Eyrolles.
- [2] **AFGC** : Groupe de travail Recommandation pour l'emploi des bétons autoplaçants, AFGC/PN B@P., Recommandations provisoires pour l'emploi des bétons autoplaçants, 63 p. Janvier 2008
- [3] **Assie, S** « Durabilité des bétons autoplaçants », thèse de doctorat de L'INSA de Toulouse, 2004.
- [4] **BATIMAG**, revue spécial huitième salon BATIMATEC, Mai 2005.
- [5] **BENSEBT SALAH EDDINE**, Formulation et propriétés des bétons autoplaçants, thèse de doctorat, 20 juillet 2008, UM.Constantine ; Algérie.
- [6] **Bezzi Tiziri, Souidi Fatiha, Chelouah Nacer**, Influence de l'ajout d'une argile locale, cuite et broyée, sur la résistance a la compression et le retrait d'un beton autoplaçant, Université Abderahmane MIRA, Béjaia, Algérie,
- [7] **Bezzi.T**, étude et caractérisation d'un béton autoplaçant fait à base d'un ciment avec ajout d'argile cuite et broyée, thèse de magistère, 2011.
- [8] **BOUCHENEB YACINE** : mémoire de magistère, Retrait plastique des bétons autoplaçants ,université de Mouloud Mammeri,Tizi-Ouzou,2011.
- [9] **BOUKNI BAZIZA** : tenue en feu des bétons autoplaçants ; thèse de magistère, décembre 2007, Mentourie Constantine, Algérie.
- [10] **Chaoueche.L**, confection d'un béton autoplaçant à base de matériaux locaux, PFE, université de Bejaia,2011.
- [11] **Chelouah N., Mehidi K., Chikh Amer H., Souidi F.**, 2009, Etude de l'influence de l'ajout d'argile broyée cuite sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des bétons, Rapport de recherche, J0400620070006, p.1-20, 2009
- [12] **CIMBETON**, le béton, les techniques de la mise en place du béton évoluent, **CSTB** magazine N°109 Novembre 1997.
- [13] **CSTC** « Centre de recherche » Béton et ouvrages en béton rapport d'activité, Belgique, 2004.
- [14] **Direction technique et commerciale béton** : www.béton-vicats.fr.
- [15] **DREUX .G.** « Le nouveau guide de béton ».
- [16] **EFNARC**, Specifications and guidelines for self-compacting concrete, février 2002, 32 pages. expérimentale, CERIB, février 2001.

Références bibliographiques

- [17] **F. Souidi, N. Chelouah, A. Noumowé, A. Kaci**, Communication. Exploitation d'argile dans la fabrication de mortiers écologiques, matériaux 2010-18-22, NANTES, France ,octobre 2010.
- [18] **J.BARON et J. OLLIVIER**, les bétons bases et données pour leurs formulations, EYROLLES, 1999.
- [19] **J.C BRAQUENIER et J DESNYTER** « Le béton autoplaçant ou autocompactant »,2000.
- [20] **JOURNAL DE CETE** (Centre d'étude Technique de l'Environnement, Lyon.
- [21] **KHAYAT et YAHIA**, effect of welan gum: High range reducer combination on rhedogy of cement grout 1997.ACI materials journal, vol 94N°5, September- October.
- [22] **KHAYAT.H.** « Optimisation et caractérisation des bétons autoplaçants pour coffrages fortement armes », Université de Sherbrook Québec, CANADA
- [23] **LEGRAND C**, la structure des suspensions de ciment, thèse de doctorat, université Paul Sabatier de Toulouse, 1982.
- [24] **MAHER EL BARRAK**, thèse de doctorat contribution à l'étude de l'aptitude ç l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 12juillet 2005.
- [25] **MATA LUIS .A.2004** ,implementation of self-consolidating concrete (SCC) for prestressed concrete Girde, Master thesis of science in Civil engineering, Raleigh north Cardinal.
- [26] **Meziani.M**, influence de l'ajout de brique broyée dans un béton autoplaçant,mémoire de magister ,université de Bejaia, 2009
- [27] **OKAMURA.H.OZAWA** 1994, Self compacting concrete journal of advanced concrete technology.
- [28] **P.ROUGEAU et CH MARRY DIPPE, O.FRANCY**, Les BAP : synthèse des connaissances et compagne
- [29] **PH.TURCRY et A.LOUKILI**, Différentes approches pour la formulation des BAP, revue française de génie civil volume 7 n°4, 2003.
- [30] **PHILIPPE TURCRY** « retrait et fissuration des bétons autoplaçant influence de la formulation »Université de NANTES/ 03 Février 2004.
- [31] **Powers**, properties of fresh concrete, 1988, edition Wiley, 664 pages.
- [32] **PROUST .E** ;Retrait et fluage des bétons autoplaçants, vers une meilleur compréhension des comportements diffères, thèse de doctorat de L'INSA de Toulouse 2002.
- [33] **SEDRAN THIERRY** ;Les bétons autonivellents, synthèse bibliographique ; thèse de doctorat d'école national des ponts et chaussées, mars 1999.

Références bibliographiques

[34] **SU N., HSU K.C., CHAI H.W.**, "A simple mix-design method for self compacting concrete", *Cem Concr Res*, 31(12), pp1799-1807, (2001).

[35] **YAMMINE JOUMANA.**, rhéologie des bétons fluides à hautes performances relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques, thèse de doctorat, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 262 p, 2007.

[36] **ZINNE EDDINE ABIB**, Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants, thèse de magistère en Génie Civil, USTHB, Alger 2004.