

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil

Elaboration d'un béton autoplaçant à base de fillers calcaires



■ Elaboré par : El-fodil Abdelatif

Proposé et dirigé par Mme A.Chikh

Promotion juin 2009

Remerciement

Remerciement

Je tiens à remercier en premier lieu DIEU Miséricordieux qui m'a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.

Mes sincères remerciements vont à M^{me} CHIKH qui a bien voulu diriger les travaux de ce mémoire. Sa gentillesse, ses précieux conseils, et son aide inestimable. Qu'elle trouve ici l'expression de mon respect.

Je voudrais remercier M^r M. MADANI, ingénieur du laboratoire ACT qui a dirigé tous mon travaille au sein du labo .

Également, je tiens à remercier tout le personnel de la société ACT en particulier les gens du labo.

Ma gratitude va également au M^{er} CHIKH qui lui aussi ma beaucoup aider.

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

Ma gratitude va également à Terbah Mohamed et M^{elle} Boukais Ibtissem

Je remercie ma famille et tout ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment

RÉSUMÉ

Un béton autoplaçant (BAP) est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration. Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

L'objectif de cette recherche est de développer un certain nombre de formulations de bétons autoplaçants se caractérisant par une ouvrabilité élevée et une bonne stabilité, et d'étudier le comportement d'un béton autoplaçant comportant des fillers calcaires.

Ce travail a mis en évidence l'intérêt de la substitution partielle du ciment par des fillers calcaires.

Mots clés

béton autoplaçant, béton vibré, formulations de bétons

SYNOPSIS

A self compacting concrete is a fluid, homogenous and stable concrete, which spread readily into place under gravity, without any vibration. This concrete must have a good resistance to segregation, and the some qualities as an ordinary concrete.

Such concrete has a very good deformability, and it facilitates the casting of congested or restricted areas with complex shapes.

This study has been carried in order to develop same formulations of self compacting concrete, with right workability and good stability, when calcareous fillers are added

Key words

compacting concrete, ordinary concrete, formulations of self compacting

ملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا من بين التقنيات الجديدة تتميز بسهولة التشوه و التجانس و الثبوت التي تمكنها من التوضع خاضعة لقوة ثقلها فقط دون الحاجة إلى عملية الاهتزاز.

تتجانس الخرسانة جيدا مع أشكال القولية الأكثر تعقيدا. ويجب أن تقدم خصائص مقارنة بالخرسانة العادية الخاضعة للرج. الهدف من هذا البحث هو تطوير بعض أنماط تشكل الخرسانة المرصوصة ذاتيا والتي تتميز بقابلية تشغيل عالية وثبات ودراسة هيئة الخرسانة المرصوصة ذاتيا اتجاه التركيبة الكلسية. هذا العمل يوضح أهمية التوزيع الجزئي للاسمنت بالتراكيب الكلسية..

كلمات مفاتيح

الخرسانة المرصوصة ذاتيا, عملية الاهتزاز, تركيبة الخرسانة المرصوصة

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

PARTIE I: ETUDE THEORIQUE

Chapitre I. Définition et propriétés des BAP.....4

I.1 Définition des bétons autoplaçants	4
I.2 Historique des bétons autoplaçants	4
I.3 Spécificité de la composition des bétons autoplaçants	6
I.4 Matières premières utilisées dans les bétons autoplaçants	6
I.4.1 Les granulats	7
I.4.2 Le liant.....	7
I.4.2.1 Le ciment.....	7
I.4.2.2 Les ajouts minéraux.....	8
I.4.3 L'eau.....	10
I.4.4 Les adjuvants.....	10
I.4.4.1 Les différents types d'adjuvants.....	10
I.4.4.2 Les superplastifiants.....	12
I.4.4.3 Les agents de viscosité.....	13
I.5 Relations entre les différentes propriétés d'un BAP.....	14
I.6 Cahiers des charges d'un BAP.....	15

Chapitre II. Caractérisation d'un béton autoplaçant.....17

II .1 Essais de fluidité.....	17
II.1.1 Essai d'étalement.....	17
II.1.2 Vitesse d'écoulement.....	17
II.1.3 Essai de la boîte en L.....	19
II.1.4 Essai de la table de fluidité.....	20
II.1.5 Essai du Box.....	20
II .2 Essai de stabilité.....	21
II.2.1 Essai de l'entonnoir en forme de V.....	21

II.2.2 Essai de tassement.....	21
II.2.3 Ségrégation dynamique.....	22
II.2.3.1 Essai du tube en U.....	22
II.2.3.2 Essai de la capacité de remplissage (Essai du caisson).....	23
II.2.3.3 Essai de stabilité au tamis.....	24
II.2.4 Ségrégation statique.....	24
II.2.4.1 Essai à la bille.....	24
II.3 Notion de déformabilité et capacité de remplissage.....	25
II.4. Caractéristiques des BAP à l'état durci	27
II.4.1. Propriétés mécaniques des BAP.....	27
II.4.2. Le retrait.....	27
II.4.3 Le fluage.....	28

Chapitre III : Formulation d'un béton autoplaçant.....29

III.1 Principes de formulation.....	29
III.1.1 Optimisation des BAP.....	30
III.1.1.1 Optimisation des gros granulats.....	30
III.1.1.2 Optimisation des teneurs en ajouts minéraux.....	31
III.1.1.3 Optimisation des teneurs en ajouts chimiques	32
III.2. Méthodes de formulation.....	32
III.2.1 Formulation par la méthode japonaise de Okamura.....	32
III.2.2 L'approche suédoise [Petersson et AL 1996]	33
III.2.3 L'approche de la JSCE	33
III.2.4 Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC [De Larrard et al 1994].....	34
III.2.5 Méthode basée sur un plan d'expérience.....	35
III.3 Exemples de formulations	36
III.4 Conclusion	37

Chapitre IV. Fabrication, transport et mise en place des BAP.....39

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre V : Objectifs de l'étude.....40

Chapitre VI. Procédure expérimentale....42

VI.1 Identification des matériaux.....	42
VI.1.1 Essais sur granulats.....	42
VI.1.1.1 Echantillonnage (NF P18-553).....	42
VI.1.1.2 Analyse granulométrique.....	42
VI.1.1.3 Densités (absolue et apparente).....	45
VI.1.1.4 Coefficient d'absorption et Porosité (NF P18-554).....	47
VI.1.1.5 Coefficient Los Angeles (NF P 18-73).....	48
VI.1.2 Essais sur sable.....	48
VI.1.2.1 Module de finesse (NF P18-304).....	48
VI.1.2.2 Equivalent de sable (NF P18-533).....	49
VI.1.3 Essais sur ciment.....	50
VI.1.3.1 La résistance mécanique du ciment (NF EN 196-1).....	50
VI.1.3.2 Le temps de prise (NF P15-473).....	51
VI.1.3.2.1 Essai de consistance.....	51
VI.1.3.2.2 Essai de prise.....	52
VI.1.3.3 Analyse chimique.....	53
VI.1.4 Caractéristiques des ajouts	55
VI.1.4.1 Le superplastifiant.....	55
VI.1.4.2 Les fillers.....	55
VI.2 Elaboration des bétons	56
VI.2.1 Formulation du béton autoplaçant sans filler.....	56
VI.2.1.1 Avec une variation du dosage en superplastifiant.....	56
VI.2.2 Formulation du béton autoplaçant avec fillers.....	58

VI.2.3 Préparation de la gâchée.....	61
VI.2.4 Conservation des éprouvettes.....	61

Chapitre VII. Essais sur bétons : résultats et interprétations.....62

VII.1 Essais sur béton frais.....	62
VII.1.1 Essais au cône d'Abrams.....	62
VII.1.2. Essai de la boîte en L.....	63
VII.1.3 Essai de la stabilité au tamis.....	64
VII.1.4 Essai d'étalement modifié.....	65
VII.2 Essais sur béton durci.....	65
VII.2.1 Essai de compression (NF P 18-406).....	66
VII.2.2 Récapitulatif des résultats.....	67
VII.2.3 Observations visuelles.....	67
VII.3 Discussion et interprétation des résultats.....	67
VII.3.1 Propriétés rhéologiques.....	68
VII.3.1.1 Effet du superplastifiant.....	68
VII.3.1.2 Effet de l'ajout minéral (Fillers).....	68
VII.3.2 Propriétés mécaniques.....	69
VII.3.2.1 Effet du superplastifiant.....	69
VII.3.2.2 Effet de l'ajout minéral (Fillers).....	70
VII.4 Conclusion.....	71

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Résultat de la compilation de l'analyse chimique de la fumée de silice produite à l'usine SKW, Canada.....	9
Tableau I .2 :Effets et performances des adjuvants.....	11
Tableau II.1 : Corrélacion entre le Slump flow et le Flow table sans chocs.....	17
Tableau III.1 : Exemples de formulations de BAP.....	36
Tableau III.2: Exemple de formulation des BAP fabriqués en France.....	36
Tableau III.3 : Formulation de BAP et bétons ordinaires vibrés, réalisés et caractérisés par PERSSON.....	37
Tableau VI.1 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	43
Tableau VI.2 : Analyse granulométrique du gravier 8/15.....	43
Tableau VI.3 : Analyse granulométrique du sable (0/1).....	44
Tableau VI.4 : Analyse granulométrique du sable (0/3).....	45
Tableau VI.5: Densités apparentes.....	46
Tableau VI.6 : Densités absolues.....	47
Tableau VI.7 : Coefficient d'absorption et porosité.....	47
Tableau VI.8 : Résistance à la fragmentation (LA).....	48
Tableau VI.9: Module de finesse du sable.....	49
Tableau VI.10: Valeur de l'équivalent de sable.....	50
Tableau VI.11: Différentes classes de ciment.....	51
Tableau VI.12: Quantité d'eau optimale.....	52
Tableau VI.13: Composition chimique du ciment.....	53
Tableau VI.14 : Résultats analytiques intermédiaires.....	54
Tableau VI.15: Composition minéralogique du ciment.....	55
Tableau VI.16 : Composition des BAP1 et BAP2.....	57
Tableau VI.17 : Composition d'un BAP avec 5% de filler.....	58

Tableau VI.18 : Composition d'un BAP avec 10% de filler.....	59
Tableau VI.19 : Composition d'un BAP avec 15% de filler.....	60
Tableau VII.1 : Résultats d'essai du cône d'Abrams.....	63
Tableau VII.2 : Résultats d'essai de la boîte en L.....	64
Tableau VII.3: Résultats de l'essai de la stabilité.....	65
Tableau VII.4 : Résistances à la compression des bétons étudiés.....	67
Tableau VII.5 : Récapitulatif des performances des différents types de bétons à l'état frais et durci.....	67

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Le pont Akashi Kaikyo.....	5
Figure I.2 : Un choix judicieux pour une multitude variée de matériaux.....	7
Figure I.3 : Capacité de remplissage ou déformabilité maximale (Ozawa et coll. 1992).....	14
Figure I.4 : Formation de vides lors du coulage de béton.....	15
Figure II.1 :Essai d'étalement au cône d'Abrams	18
Figure II.2 : Essai de la boîte en L, d'après TESTING – SCC (European Research Project).	19
Figure II .3 : Essai du Box.....	20
Figure II.4 :Essai de l'entonnoir en forme de V d'après SAKATA	21
Figure II.5 : Essai de tassement (MANAI, 1995).	22
Figure II.6 : Essai du tube en U	23
Figure II.7 : Essai du caisson, d'après YURUGI et al (1993).....	23
Figure II.8 : Essai à la bille.....	25
Figure II.9 : Essai de la boîte, capacité de remplissage (OZAWA et coll. 1992).....	26
Figure II.10 : Variation du volume de béton passant en fonction de l'affaissement (Essai de la boîte, OZAWA et coll. 1992).	26
Figure II.11: Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant, d'après HAYAKAWA et al (1993).....	27
Figure III.1 : Courbe de référence d'un béton autoplaçant, d'après MBT France	31
Photo VI.1: Echantillonneur.	42
Photo VI.2: Essai de densité apparente (etape1).....	46
Photo VI.3: Essai de densité apparente (etape2).....	46
Photo VI.4 : Essai de densité absolue	46
Photo VI.5 : Appareil de Los Angeles	48
Photo VI.6 Essai de consistance.....	52
Photo VI.7 : Appareil de Vicat.....	52

Photo VI.8 : Temps de prise.....	53
Figure VII.1 : Étalement d'un BAP.....	62
Figure VII.2 : Essai d'étalement.....	62
Figure VII.3 : Boîte en L.....	63
Figure VII.4 :Essai de stabilité au tamis.....	64
Figure VII.5. Essai d'étalement modifié.....	65
Figure VII.6 : Essai de compression.....	66
Figure VII.7 : Résistances à la compression de deux BAP à différents dosages en SP	69
Figure VII.8 : Influence de la présence et du dosage des fillers sur la résistance à la compression....	70
Figure VII.9 : Résistance de compression à 28jours des différents bétons.....	71

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les structures actuelles se caractérisent par la complexité de leurs modèles telles que les formes variables et les courbures multiples, ainsi que par leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons ordinaires à ce types d'ouvrages très difficile avec des défaillances structurales très probables. Toutefois, pour construire des structures durables et fiables il est nécessaire non seulement de développer des bétons de qualité, mais aussi d'assurer une mise en place correcte afin de répondre aux exigences nécessaires pour la mise en service de la structure.

La durabilité d'une structure en béton dépend étroitement des différentes étapes de sa réalisation et de la méthode de sa conception. Jusqu'à la mise en service de la structure, le béton mis en place traverse trois étapes importantes où certaines exigences doivent être satisfaites. On distingue : l'état frais, l'état à jeune âge et l'état durci.

- **À l'état frais :** On doit s'assurer d'une bonne mise en place dans les coffrages, en ayant un béton uniforme et homogène qui remplit parfaitement les différentes zones même celles où l'accès est difficile à cause d'une forte concentration en armatures.
- **Au jeune âge :** On doit assurer une résistance suffisante du béton à la traction, afin d'éviter les fissures causées par le retrait plastique et le dégagement excessif de chaleur. De bonnes conditions de mûrissement et une génération modérée de température si nécessaire sont alors recommandées.
- **À l'état durci :** On s'intéresse à des performances mécaniques appropriées et à de faibles valeurs de perméabilité. Ces facteurs combinés contribuent à garantir une durée de service prolongée de la structure.

Des trois états présentés ci-dessus, l'état frais du béton constitue l'étape la plus importante et la plus délicate.

En effet, même si l'on arrive à produire en laboratoire un béton conforme aux exigences en matière de performances mécaniques, il se peut que ces objectifs ne soient pas atteints au niveau de la structure si la mise en place est imparfaite ; une présence de nids d'abeille et des signes de ségrégation après le décoffrage peuvent être constatés s'il y a une insuffisance ou un excès d'énergie de vibration durant la mise en place.

Ceci est souvent le résultat d'une main-d'œuvre peu qualifiée, et d'un manque de surveillance et de coordination sur chantier entre l'ingénieur concepteur et l'ingénieur chargé de l'exécution des travaux.

Afin d'assurer des structures uniformes et d'éviter de telles erreurs de mise en place du béton, surtout dans le cas où le niveau de congestionnement est élevé, l'idée de produire des bétons fluides qui s'étalent dans les coffrages sans effort de vibration, est une solution intéressante. C'est ainsi que le concept du béton autoplaçant est né.

Les bétons autoplaçants BAP (angl. Self Compacting Concrete SCC) constituent une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures face à une main-d'œuvre de moins en moins qualifiée. Cette gamme de béton se caractérise par une grande ouvrabilité, une grande déformabilité et une stabilité appréciable, et donne des structures résistantes et durables.

Ces bétons peuvent être mis en place sans vibration, seulement sous l'effet de la gravité, tout en développant une bonne compacité sans exiger une main-d'œuvre spécialisée durant la consolidation. Ces propriétés contribuent à assurer un béton durable et de qualité. Selon la densité du ferrailage et la complexité des éléments structuraux, le besoin de vibration peut diminuer considérablement et même être éliminé, ce qui représente une économie de main-d'œuvre considérable et réduit de façon très importante les nuisances sonores.

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

Le travail que nous présentons dans ce mémoire a quatre objectifs principaux :

- 1) Optimisation des bétons autoplaçants (teneurs en gros granulats, sable et liant) ;
- 2) Développement des formulations de béton autoplaçant qui répondent à certains critères rhéologiques, tels qu'une bonne déformabilité, tout en assurant une meilleure résistance au ressuage, à la sédimentation et à la ségrégation ;
- 3) Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci ;
- 4) Comparaison entre le comportement d'un béton autoplaçant avec seulement un adjuvant et celui des bétons autoplaçants avec adjuvant et filler avec variation de pourcentage des fillers vis-à-vis des résistances mécaniques, du retrait, et de l'absorption capillaire.

Le présent mémoire se compose de sept chapitres présentés comme suit :

Les quatre premiers chapitres feront l'objet d'une analyse bibliographique:

Afin d'initier le lecteur à mieux comprendre certains termes relatifs à la technologie des bétons, nous avons jugé nécessaire d'entamer notre travail par des généralités. Ce premier chapitre présente également des définitions et diverses propriétés du béton autoplaçant.

Le second chapitre présente des notions fondamentales relatives aux caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants et les résultats donnés dans la littérature, qui sont relatifs aux diverses expériences de laboratoire sur l'optimisation des teneurs en gros granulats, sable, liant, ajouts chimiques et minéraux; et la caractérisation mécanique des bétons autoplaçants.

Le troisième chapitre est une récapitulation des différentes méthodes de formulation des bétons autoplaçants

Le quatrième chapitre donne les principales règles concernant la fabrication, le transport et la mise en place des BAP

Le cinquième chapitre définit les objectifs de l'étude

Les deux derniers chapitres seront consacrés à l'étude expérimentale :

Nous présentons au sixième chapitre l'ensemble des essais d'identification des matériaux, en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire. La méthode de formulation suivie pour la fabrication de chaque béton est également présentée.

Les résultats des essais effectués sur le béton frais et durci, ainsi que leurs interprétations sont regroupés au septième chapitre.

Une conclusion générale permet de faire la synthèse des principaux résultats de ce travail et de proposer des voies pour de futurs travaux.

Première Partie

Partie Théorique

CHAPITRE I

Définitions et propriétés

Chapitre I

Définition et propriétés des BAP

I.1 Définition des bétons autoplaçants

De nombreux termes définissent ce béton : béton autonivelant, béton autocompactant (SCC : self compacting concret en anglais), ou béton hyperfluide. Cependant, l'appellation la plus utilisée aujourd'hui dans le domaine de la construction est béton autoplaçant, terme utilisé dans ce travail.

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, homogènes et stables. La caractéristique principale de ces bétons réside dans le fait qu'ils se mettent en place sans vibration sous le seul effet de la pesanteur. Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, grâce à leur bonne uniformité une fois mis en place. Par conséquent ils offrent la résistance et la durabilité voulues.

On utilise le terme de bétons autonivelants (BAN) pour les dalles et toutes les parois horizontales et de bétons autoplaçants (BAP) pour les murs et toutes les parois verticales.

Les principes de formulation des bétons autoplaçants se distinguent par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment + sable + eau + adjuvants + fines) plus élevé que les bétons ordinaires. Ils se caractérisent aussi par une quantité de fines élevée et l'emploi d'adjuvants appelés superplastifiants.

Une nouvelle famille d'adjuvants, appelés rétenteurs d'eau ou agents viscosifiants, 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 ségrégation.

La dernière caractéristique des BAP est qu'ils contiennent une faible proportion de granulats de l'ordre de 20 à 25 millimètres. Pour ces bétons, on essaie le plus possible de travailler avec des granulats de 16mm de taille maximale, voire dans la mesure du possible moins.

Ce sont ses propriétés à l'état frais qui distinguent essentiellement le béton autoplaçant du béton ordinaire, le BAP s'écoule sous son propre poids avec un débit suffisant sans qu'il soit nécessaire de faire appel à des moyens de vibration ou de serrage. Le BAP doit pouvoir ainsi s'écouler sans vibration dans des zones confinées ou très ferraiillées, tout en possédant une fluidité élevée, et une bonne résistance à la ségrégation. [12]

I.2 Historique des bétons autoplaçants

L'idée de produire des bétons autoplaçants est apparue pour la première fois au Japon en 1986, le Japon fut le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique de fabrication du béton.

Ces bétons très fluides étaient en même temps stables et présentaient une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage.

Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on s'est inspiré de la technique des bétons coulés sous l'eau ; en effet, la première génération des bétons autoplaçants 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. Ces bétons contiennent souvent des agents de viscosité ou agents colloïdaux afin de résister à la ségrégation des gros granulats et au phénomène de ressuage. L'utilisation de cette nouvelle gamme de béton est en train de devenir de plus en plus répandue partout dans le monde. En effet depuis 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.

Les bétons autoplaçants offrent un grand nombre de possibilités très intéressantes dans de nombreux domaines : construction, renforcement et réparation d'ouvrage d'art (application de couches minces dans des endroits difficiles d'accès), construction d'éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour toute utilisation (bétons coulés sous l'eau pour des réparations, bétons confinés, pieux,.....etc.).

À titre d'exemple nous citerons quelques réalisations japonaises :

- ♦ le pont Kiba park. où 650m^3 de bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPa ; [1]
- ♦ le pont Akashi Kaikyo (Figure 1.1), le plus long pont suspendu au monde (3910m, 1991m entre les deux pylônes) où $770\,000\text{m}^3$ de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMURA et coll. 1994); [2]



Figure I.1. Le pont Akashi Kaikyo

- ♦ le bâtiment Landmark Tower où un béton autoplaçant d'excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40m de hauteur chacune (Hayakawa et coll. 1995) ; [3]
- ♦ le stade de Fukuoka où 10 000m³ de béton autoplaçant ont été utilisés pour des sections très ferrillées et de formes compliquées (Izumi et coll. 1995). [4]

D'autre part, plusieurs autres structures (réservoirs, murs de soutènement, poteaux, etc.) ont été construites totalement ou partiellement avec des bétons autoplaçants.

I.3 Spécificité de la composition des bétons autoplaçants

Les approches de composition des BAP sont basées sur les critères suivants : [12]

a) Une quantité de fines importante

Les compositions des bétons autoplaçants comportent une importante quantité de fines, (environ 500 kg/m³ de diamètre inférieur à 80µm) pour assurer la maniabilité et éviter les risques de ségrégations et de ressuage.

b) Un volume de pâte élevé

Le rôle de la pâte (ciment + eau efficace + air occlus + additions) est d'écarter les granulats, afin de diminuer les frottements qui provoquent la limitation vis-à-vis de l'étalement du béton et la capacité de remplissage des coffrages.

c) Utilisation de superplastifiants

La maniabilité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Cet ajout ne doit pas être très élevé. Sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de ségrégation et du ressuage, on opte pour une éventuelle utilisation d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité). [8].

Ce sont généralement des dérivés celluloses, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui augmentent la viscosité de l'eau. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

Ces adjuvants semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant élevés, mais leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faible. Les agents de viscosité ont la réputation de rendre les bétons autoplaçants moins sensibles à des variations de la teneur en eau, ils peuvent en parallèle conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la maniabilité.

d) Un faible volume de gravillons

Les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec l'augmentation des teneurs en gros granulats. Les BAP peuvent être réalisés avec des granulats roulés ou concassés, le diamètre maximal des gravillons dans un BAP étant compris entre 10 et 20mm. Le rapport gravillons/sable pour les BAP est voisin de 1. [5]

I.4 Matières premières utilisées dans les bétons autoplaçants

L'obtention d'un béton de qualité nécessite un choix judicieux quant à ces composants. Pour cela une connaissance approfondie des matériaux intervenant dans la composition du béton s'avère primordiale.

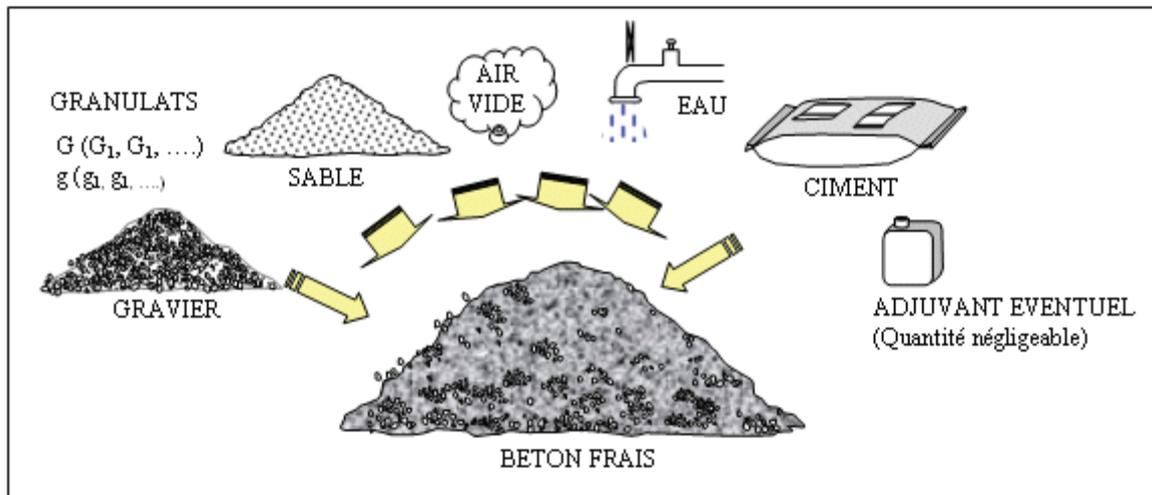


Figure I.2. Un choix judicieux pour une multitude variée de matériaux

I.4.1 Les granulats

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

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

Cependant pour le sable, et face au problème de surexploitation des gisements, il est préférable d'utiliser un sable concassé qu'un sable roulé. De plus, sa granulométrie peut être rendue quasi uniformément riche sur une étendue granulaire imposée par criblage, ce qui n'est pas le cas pour un sable roulé qui a une granulométrie presque monogranulaire.

De plus, le sable concassé apporte au mélange une part considérable de fines qui améliorent la maniabilité, la compacité, la résistance et la durabilité du béton.

D'autre part la flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est meilleure, en 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 16mm.

I.4.2 Le liant

I.4.2.1 Le ciment :

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments. Cependant, compte tenu des exigences de démoulage aux jeunes âges, les BAP utilisés dans l'industrie du béton contiennent presque toujours du ciment CPA-CEM I 52.5 ou 42.5.

I.4.2.2 Les ajouts minéraux :

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

- des fillers calcaires (calcite, dolomite,...) ;
- des fillers siliceux ;
- des laitiers de haut fourneau ;
- des cendres volantes ;
- des fumées de silice.

L'utilisation d'ajouts minéraux présente des intérêts : écologiques fonctionnels et économiques. [12]

- *Bénéfices écologiques*

Le développement durable du béton permet entre autres de réduire l'émission des gaz à effet de serre. La production d'une tonne de ciment libère environ la même quantité de CO₂ dans l'atmosphère. Le remplacement d'une partie de ciment par des ajouts cimentaires permettra de diminuer de façon systématique la quantité de CO₂ émise.

- *Bénéfices fonctionnels*

- Le remplacement d'une fraction de ciment par des cendres volantes ou de laitier permet d'obtenir un maintien d'ouvrabilité plus long. Les fillers calcaires ont un effet inverse, ils constituent des sites de nucléation pour la formation des hydrates et favorisent ainsi la prise du matériau.
- La substitution d'une quantité de ciment par des fines diminue la chaleur d'hydratation dégagée lors de la confection du béton, ce qui évite la fissuration d'origine thermique.

- *Bénéfices économiques*

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

La fumée de silice

La fumée de silice lorsqu'elle est introduite dans le BAP (Clergue et Monachon, 1998), conduit à des propriétés semblables à celles obtenues pour les bétons à hautes performances à savoir une augmentation de la compacité et donc des résistances mécaniques plus élevées, grâce à ses caractéristiques physico-chimique, telles que la très grande finesse et la teneur en silice (plus de 92%) ainsi que sa structure vitreuse.

Les fumées de silices ont une composition chimique très constante, le laboratoire de la société canadienne SKW qui produit des fumées de silice provenant de la fabrication de silicium ou de ferro-silicium a publié les résultats de la compilation de l'analyse chimique de 32 échantillons de fumées de silice prélevés quotidiennement.

Tableau I.1. Résultats de la compilation de l'analyse chimique de la fumée de silice Produite à l'usine SKW, Canada. [6]

Teneur (%)	Moyenne	Écart-type	Valeur la plus élevée	Valeur la plus faible
SiO ₂	92.1	1.3	94.9	89.1
Al ₂ O ₃	0.25	0.12	0.70	0.16
Fe ₂ O ₃	0.79	0.70	3.1	0.22
Na ₂ O	0.17	0.04	0.11	1.1
K ₂ O	0.96	0.22	1.44	0.56
SO ₃	0.36	0.1	0.57	0.16
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	93.1	1.44	95.7	90.3

a) Actions des fumées de silice

Les fumées de silice peuvent agir selon trois mécanismes d'action : [6]

- *Effet pouzzolanique*

Grâce à leur finesse, les fumées de silice réagissent très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former du C-S-H, et on peut observer des gains de résistance en compression au jeune âge (7 jours) contrairement à la pouzzolane naturelle ou artificielle pour lesquelles il faut attendre plus de 28 jours pour observer des gains de résistance en compression.

- *Effet physico-chimique*

L'utilisation de la fumée de silice a pour effet de rendre le béton plus compact et imperméable. Grâce à sa réaction pouzzolanique avec la chaux dégagée par le clinker lors de l'hydratation du ciment, on observe après 7 jours que les pores ayant un diamètre de 0.1 µm commencent à se boucher en parallèle avec la diminution du diamètre des pores les plus fins. Ce phénomène se poursuit au fur et à mesure que le béton vieillit.

- **Effet physique**

Les particules de fumée de silice étant vitreuses et fines, elles permettent de remplir les pores les plus fins de l'empilement des grains de ciment.

L'utilisation de la fumée de silice exige inévitablement l'introduction d'un superplastifiant lors du malaxage du béton pour défloculer les grains de ciment et les particules de fumée de silice d'une part, et garder la même maniabilité que les bétons ordinaires d'autre part, car l'utilisation de la fumée de silice a pour effet d'augmenter la demande en eau, à cause de l'ancrage de ses particules entre elles. [6]

b) Influence des fumées de silice sur les propriétés des bétons

Par leurs caractéristiques morphologiques et minéralogiques, les fumées de silice peuvent influencer sur les propriétés des bétons à l'état frais ou à l'état durci :

- *À l'état frais*

- ❖ Augmenter le volume des particules fines dans le béton, ce qui permet de réduire les risques de ségrégation et d'éliminer pratiquement le ressuage, dans le cas des bétons autoplaçants ;
- ❖ Faciliter les conditions de transport et de mise en place du béton par pompage.

- *À l'état durci*

- ❖ Augmenter considérablement la résistance en compression et l'imperméabilité du béton
(Les bétons contenant 10% de fumée de silice deviennent pratiquement imperméables).
- ❖ Remplacer une certaine quantité de ciment et obtenir la même résistance compression à 28 jours (d'après P.C.Aîtcin, avec un dosage de 7 à 12% de la masse de ciment, 1kg de fumée de silice peut remplacer de 3 à 4kg de ciment). [6]
- ❖ Réduire considérablement la quantité de chaleur qui se développe dans un béton, grâce à la réduction du dosage en ciment.

1.4.3 L'eau

L'eau utilisée en général pour l'élaboration des bétons est celle du réseau public. Étant donné que le dosage en eau influe de manière considérable sur la viscosité et la capacité d'auto compaction il est indispensable de bien jauger l'eau de gâchage. Il est donc important de prendre compte de l'humidité des granulats spécialement de celle du sable, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

1.4.4 Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités, afin d'en améliorer certaines propriétés. Le dosage des adjuvants est faible par rapport à celui des autres constituants, il est toujours fonction du ciment et varie, selon les produits, de 0.05 à 5% au plus du poids du ciment.

I.4.4.1 Les différents types d'adjuvants

Le tableau I.2 résume les différents types d'adjuvants ainsi que leurs performances par rapport un béton témoins. [7]

Tableau I.2 Effets et performances des adjuvants. [7]

Adjuvants	Effet(s)	Performances par rapport à un béton témoin
Plastifiant réducteur d'eau	Réduction du dosage en eau	$\geq 5\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 7 et 28 jours	$\geq 110\%$
Superplastifiant haut réducteur d'eau	Réduction du dosage en eau	$\geq 12\%$
	Augmentation de la résistance à la compression au jeune âge	$\geq 140\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 28 jours	$\geq 115\%$
	Augmentation de l'affaissement au cône d'Abrams	$\geq 120\text{mm}$
Rétenteur d'eau	Diminution de l'eau ressuée	$\leq 50\%$
Entraîneur d'air	Augmentation de l'air entraîné	$\geq 2.5\%$
Accélérateur de prise	Augmenter le temps de début de prise	$\geq 30\text{min}$
	Diminution du temps de début de prise à 5°	$\leq 60\%$
Accélérateur de durcissement	Augmentation de la résistance à la compression à 7 et 28 jours à 24 h et à 20°	$\geq 120\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 7 et 28 jours à 48h et à 5°	$\geq 130\%$
Retardateur de prise	Augmenter le temps de début de prise	$\geq 90\text{min}$
	Diminuer le temps de fin de prise	$\leq 360\text{ min}$
hydrophobant	Absorption capillaire pendant 7 jours après 7 jours de conservation	$\leq 50\%$

Les superplastifiants sont les plus utilisés pour la confection de bétons autoplaçants, ils permettent d'obtenir des bétons maniables et ouvrables par défloculation des grains de ciment. À une consistance donnée ils offrent la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et la mise en place du béton, et par conséquent augmenter les caractéristiques mécaniques du béton. [13]

L'usage d'adjuvants a besoin d'être bien contrôlé, parce que toutes les combinaisons ne sont pas toujours compatibles et bénéfiques pour les propriétés du béton. Quelques-uns de ces produits réagissent les uns avec les autres, avec des phases du ciment ou les produits d'hydratation. L'utilisation des superplastifiants en combinaison avec les ajouts cimentaires a ouvert plusieurs voies technologiques intéressantes telles que : les bétons à hautes performances, les bétons autoplaçants et les bétons à poudres réactives.

Les agents réducteurs d'eau ordinaires tels que les lignosulfonates sont utilisés dans des bétons ayant un rapport eau/ciment de 0,40 ou plus. Quand une réduction d'eau plus élevée est exigée, l'usage de superplastifiants est recommandé. [8]

Une nouvelle génération de superplastifiants à base de polyacrylates a été développée récemment et peut accomplir la même réduction de l'eau que les superplastifiants antérieurs pour un dosage qui est beaucoup plus faible. Quelques ajustements sont faits pour diminuer les effets secondaires de ces produits; tels que l'entraînement excessif d'air ou un retard excessif de la prise du ciment.

D'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (ou modificateurs de la viscosité) permettent la production de bétons autoplaçants. Les bétons autoplaçants nécessitent un usage simultané de superplastifiant et d'agent colloïdal. Quelques-uns de ces produits sont à base de gomme de polysaccharide et d'autres à base d'hydroxyde propyle méthyle cellulose (HMPC). Ces produits augmentent la viscosité et la stabilité des bétons autoplaçants qui ont besoin d'un dosage élevé en superplastifiants pour obtenir une bonne fluidité.

Les agents de viscosité diminuent la ségrégation et le ressuage du béton dus à un haut dosage en superplastifiant. La sélection et le dosage de ces deux adjuvants devraient être bien contrôlés et leur compatibilité bien étudiée avant d'utiliser leur effet synergique pour optimiser les propriétés du béton autoplaçant.

I.4.4.2 Les Superplastifiants

Pour ajuster la fluidité d'un BAP en fonction des contraintes de mise en place et des résistances mécaniques désirées, il est nécessaire d'utiliser un superplastifiant. Les superplastifiants utilisés pour les BAP sont les mêmes que ceux employés pour les autres types de bétons.

Les principaux superplastifiants sont à base de :

- ✓ copolymère formaldéhyde naphthalène sulfonate (PNS) ;
- ✓ copolymère formaldéhyde mélamine sulfonate (PMS) ;
- ✓ polymère avec fonction acrylate (PA) ;
- ✓ polymère avec des fonctions carboxylate (PC);
- ✓ monomère avec les fonctions phosphonate et/ou carboxylate (MPC). [13]

Les superplastifiants interagissent avec les particules de ciment et éventuellement avec les additions en s'adsorbant à leur surface ce qui permet d'éviter le phénomène de floculation au contact de l'eau. Les particules sont ainsi dispersées par combinaison d'effet électrostatique et stérique et la proportion d'eau libre est plus importante.

Pour une composition granulaire donnée, la capacité de remplissage d'un BAP dépend fortement du dosage en superplastifiant. Elle croît avec le dosage en superplastifiant jusqu'à un maximum au-delà duquel apparaissent les phénomènes de ségrégation des constituants. [8]

I.4.4.3 Les agents de viscosité

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

Pour minimiser cet effet, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation.

Ces agents sont composés de produits colloïdaux et de particules ultra fines réactives dont la taille est inférieure au micron et qui forment, au contact de l'eau de gâchage, une pâte visqueuse qui renforce considérablement la cohésion du béton.

Les agents de viscosité peuvent être de différentes natures :

- ♦ polysaccharide obtenu par fermentation microbiologique du type gomme welan ou gomme de xanthane ;
- ♦ dérivés cellulosiques à base de méthyle cellulose, d'hydroxy-éthyl cellulose ;
- ♦ colloïde naturel ;
- ♦ suspension des particules siliceuses.

L'agent de viscosité est un polymère qui interagit avec l'eau et rend la pâte du béton plus visqueuse. Une meilleure cohésion de la pâte permet de maintenir une distance entre les granulats, ce qui réduit leurs interactions de friction et de collision lors de l'écoulement du matériau et évite le phénomène de blocage au droit d'un obstacle.

Il permet de conserver une répartition homogène des différents constituants, l'action de l'agent de viscosité étant d'une certaine façon opposée à celle du superplastifiant, l'optimisation de la fluidité et de la résistance à la ségrégation d'un BAP requiert la sélection d'un couple compatible de superplastifiant et d'agent de viscosité et l'ajustement de leur dosage.

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiants croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage en agent de viscosité trop important empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité. Notons également qu'une très forte quantité d'agent de viscosité peut conduire à un entraînement d'air excessif.

Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps, sur une durée de l'ordre d'une heure.

Les BAP ont ainsi de meilleures résistances à la ségrégation dynamique et statique.

I.5 Relations entre les différentes propriétés d'un BAP

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

Le béton autoplaçant doit être capable de se déformer pour remplir les coffrages densément armés sans intervention extérieure, ceci doit se faire sans qu'il y ait risque de séparation des différents éléments du béton. Autrement dit il ne peut y avoir de compactage avec ségrégation.

Cette caractéristique est appelée capacité de remplissage, elle dépend de deux facteurs : la déformabilité et la stabilité.

En 1991, Ozawa et al ont présenté la relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton, (Figure I.2). Lorsque l'affaissement est faible, les frictions entre les particules augmentent. L'écoulement est ainsi arrêté.

Par contre lorsque l'affaissement est élevé, les granulats cisailent le mortier et se rapproche les un des autres : ceci n'étant rien d'autre que la ségrégation.

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

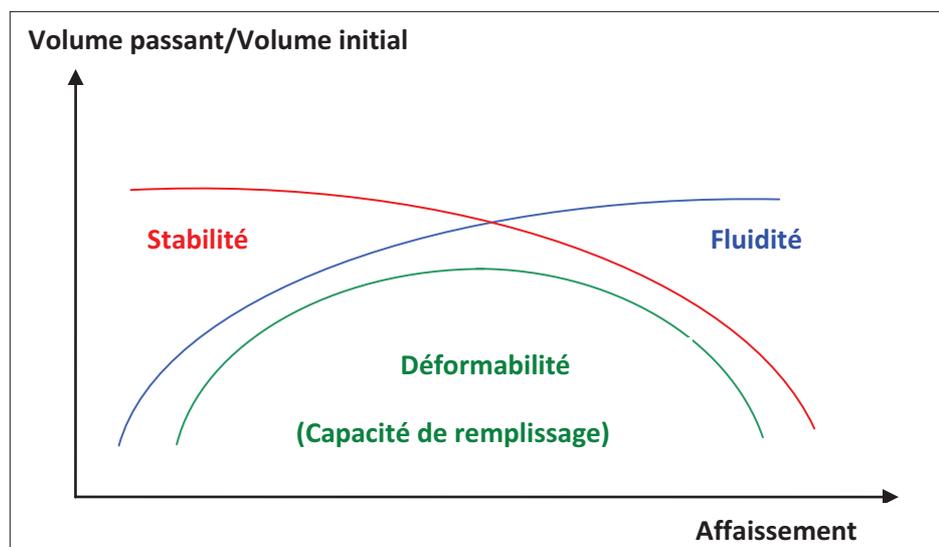


Figure I.3. Capacité de remplissage ou déformabilité maximale (Ozawa et coll. 1992). [9]

I.6 Cahiers des charges d'un BAP

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

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

- Un BAP doit avant tout s'écouler (se mettre en place) sous son poids propre, et avec un débit suffisant en milieu plan (dalle par exemple).
- Le béton doit présenter une bonne résistance à la ségrégation dynamique pour rester homogène. En phase d'écoulement dans une zone confinée, si le mortier n'est pas assez résistant, les gravillons peuvent le cisailer. Ils ont tendance à venir au contact les uns des autres, ainsi il y a formation de voûte par contacts solides, qui en se colmatant avec des parties fines interrompent l'écoulement. (Voir figure I.3)

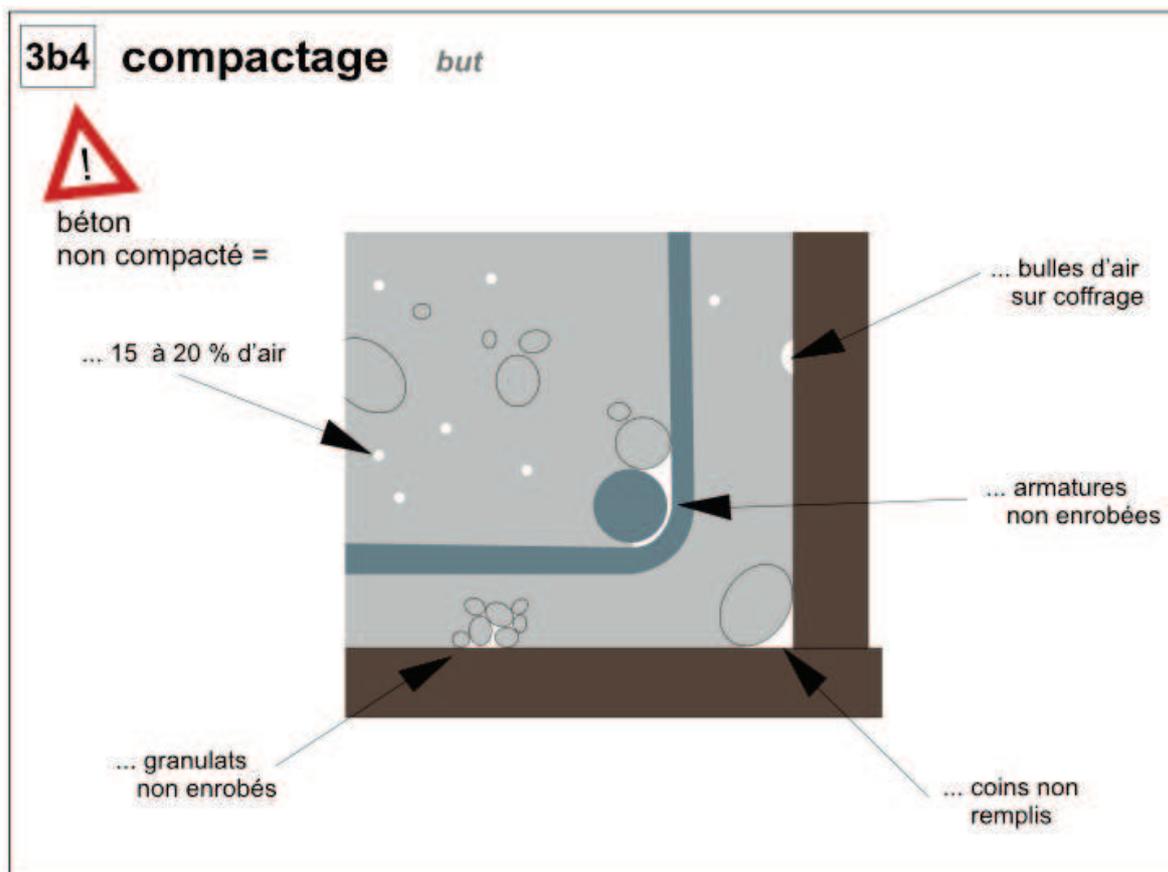
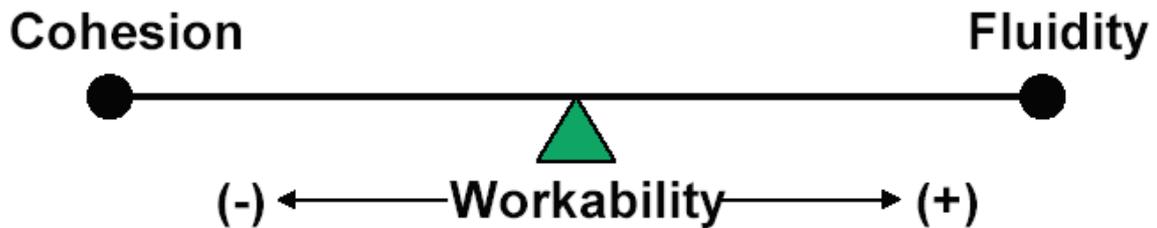


Figure I.4. Formation de vides lors du coulage de béton

- Une bonne résistance à la ségrégation statique, au tassement et au ressuage une fois mis en place jusqu'à sa prise, le béton doit avoir une bonne résistance à la ségrégation pour garder son homogénéité. Le tassement et le ressuage sont aussi à éviter.

La formulation de ce type de béton n'est pas chose aisée, car il s'agit de concilier deux propriétés contradictoire : la fluidité et la stabilité.



Vu l'importance des propriétés rhéologiques à l'état frais du BAP, un nombre d'essais s'avère important pour caractériser ce type de béton. Ceci fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE II

Caractérisation des bétons autoplacants

Chapitre II

Caractérisation d'un béton autoplaçant

Introduction

Lorsqu'on s'intéresse au BAP on se trouve souvent confronté au problème de caractérisation de ces bétons. La caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état frais consiste à décrire à l'aide d'un matériel adéquat, le comportement visqueux du béton.

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

Dans ce chapitre on étudiera essentiellement les caractéristiques des BAP à l'état frais, néanmoins on citera quelques propriétés du béton à l'état durci.

II .1 Essais de la fluidité

L'essai au cône d'Abrams, (figure II.1) est l'essai de référence pour évaluer la fluidité d'un BAP. Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a eu lieu ou pas.

II.1.1 Essai d'étalement

Il s'effectue sur une plaque métallique plane de plus de 90cm de côté et à l'aide du cône d'Abrams ou du cône DIN de la table à chocs.

À l'essai au cône d'Abrams, le BAP, du fait de sa fluidité s'étale et forme une galette dont on mesure le diamètre, qui dépasse souvent les 500 mm. La notion traditionnelle d'affaissement au cône d'Abrams n'a plus aucun sens avec ce genre de béton.

Dans le cas du cône d'Abrams l'étalement est noté slump flow et il est appelé flow table dans l'essai au cône DIN. [12]

La valeur du slump flow d'un BAP est comprise entre 540 et 700 mm. Il existe une corrélation entre le slump flow et le flow table.

À titre indicatif, quelques valeurs sont données dans le tableau II.1

Tableau II.1 : Corrélation entre le Slump flow et le Flow table sans choc [12]

Slump Flow (mm)	540	600	700
Flow tableau (mm)	430	500	680

II.1.2 Vitesse d'écoulement

On mesure le temps d'écoulement que met le béton au cours de l'essai d'étalement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50cm. Ceci donne une idée moyenne sur la viscosité qui est une propriété rhéologique importante.

La valeur typique de la vitesse d'écoulement est de 6.25 à 12.5 cm/s ; ceci correspond à un temps d'écoulement T50 variant entre 4 à 10 secondes.

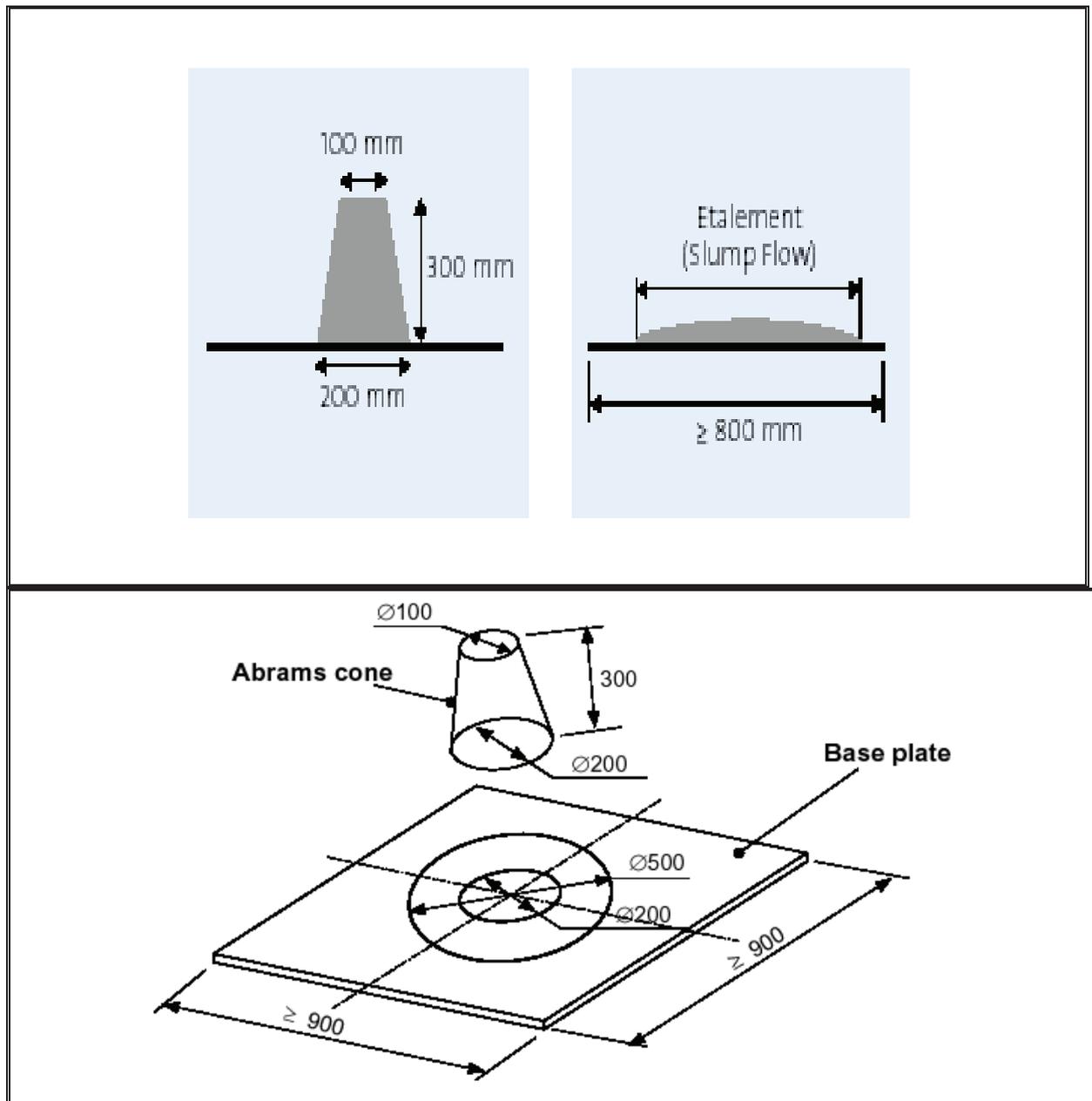


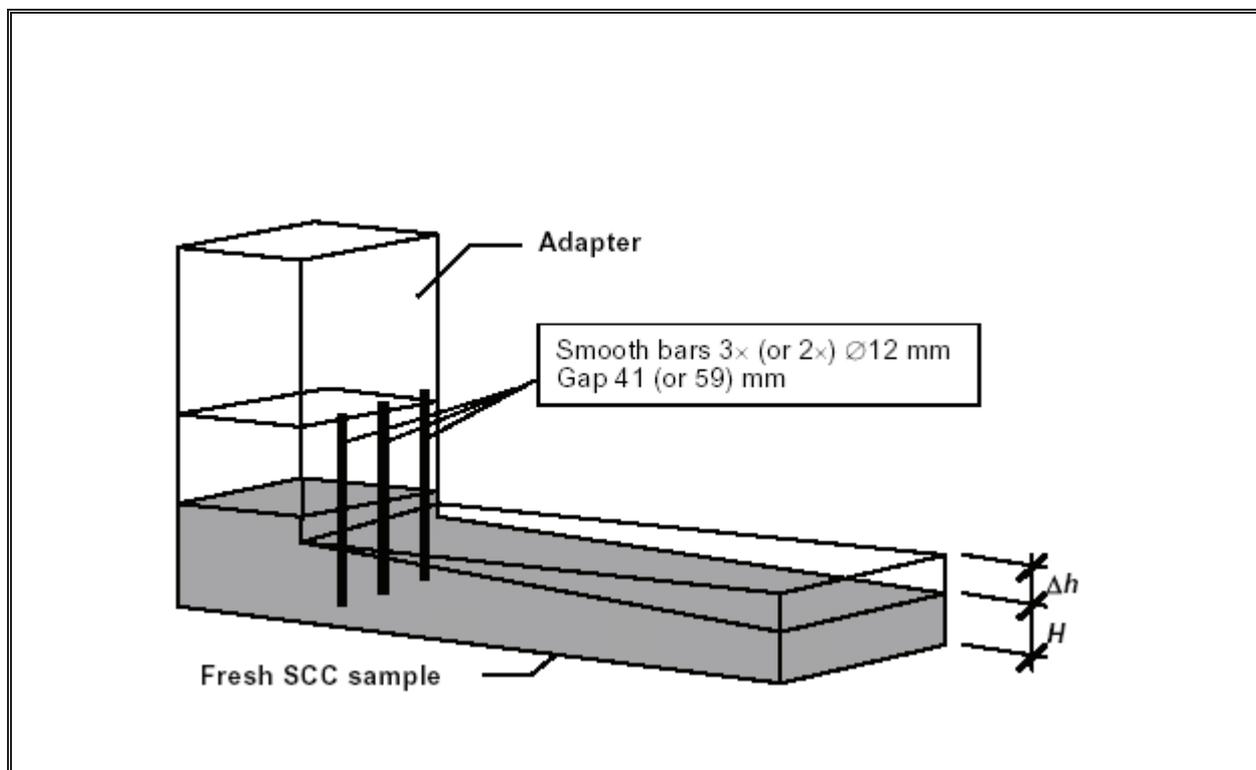
Figure II.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams [19]

II.1.3 Essai de la boîte en L

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

On remplit la partie verticale de la boîte en L de béton (figure II.2). On laisse reposer pendant une minute, et on mesure la différence de la hauteur (Δh) dans les parties verticales et horizontales. Pour un BAP, cette dernière doit être la plus faible possible.

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 de ferrailage en ne plaçant que deux barres avec un espace libre de 58mm. En cas de blocage des gravillons, il convient de diminuer le volume de la teneur en granulats d'une part, et d'augmenter le volume de pâte en maintenant le rapport Eau/Liant constant.



**Figure II.2 Essai de la boîte en L, d'après TESTING – SCC
(European Research Project). [10]**

II.1.4 Essai de la table de fluidité

L'essai d'affaissement est exécuté sur un plateau circulaire de 670mm de diamètre avec un bord élevé de 20mm. Sur ce plateau, on impose des mouvements de montée et de descente de vitesse égale à 12.5 mm/s produits par une manivelle.

Le nombre d'amplitudes qui correspondent à l'arrivée du béton au bord du plateau, au contact avec le demi périmètre et au contact total avec le plateau sont ainsi mesurés (KASAI et coll. 1991). Cet essai est aussi semblable à l'essai d'étalement " DIN1048 Flow table ".

II.1.5 Essai du Box

L'échantillon de béton est mis dans un des deux compartiments d'une boîte en Plexiglas de 150 × 150 × 400mm (Figure II.3). Quand la porte de séparation des deux compartiments est levée, on mesure la dénivellation de hauteur du béton entre les deux compartiments. Cet essai permet d'évaluer la déformabilité du mélange qui sera excellente dans le cas où la dénivellation est négligeable (KASAI et coll. 1999).

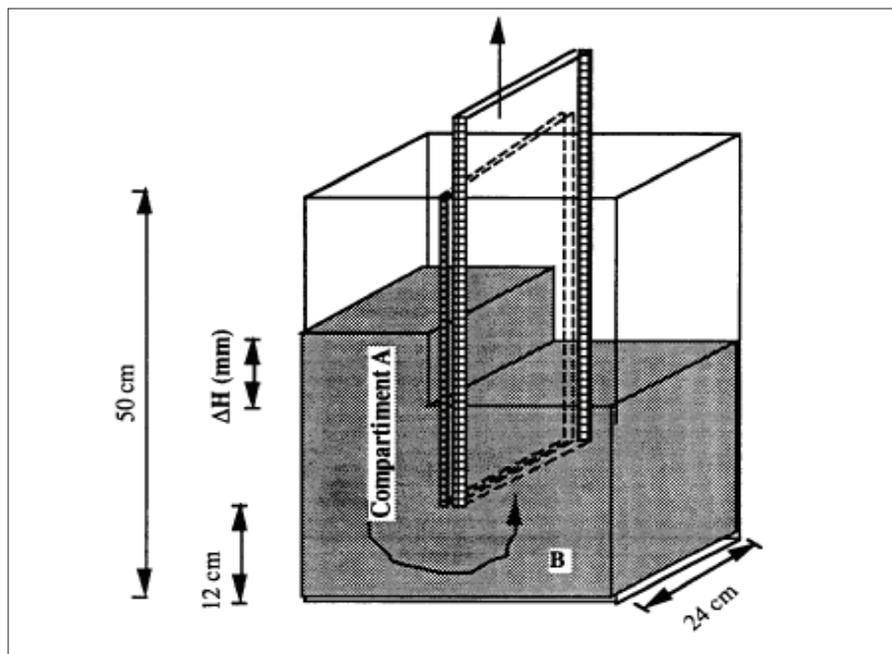


Figure II .3. Essai du Box

La fluidité à elle seule ne suffit pas pour avoir un bon béton. En effet la fluidité favorise la ségrégation et le ressuage du béton. Ces deux objectifs sont habituellement en conflit, cependant la technologie des BAP arrive à atteindre les deux propriétés simultanément. Par conséquent des essais de stabilité s'avèrent indispensables pour s'assurer de la qualité du BAP.

II.2 Essai de stabilité

II.2.1 Essai de l'entonnoir en forme de V

L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du béton dans un espace limité. Une section rectangulaire a été choisie pour imposer un écoulement du même type que celui qui est imposé entre deux armatures parallèles. Cet essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement. (Figure II .4). [8]

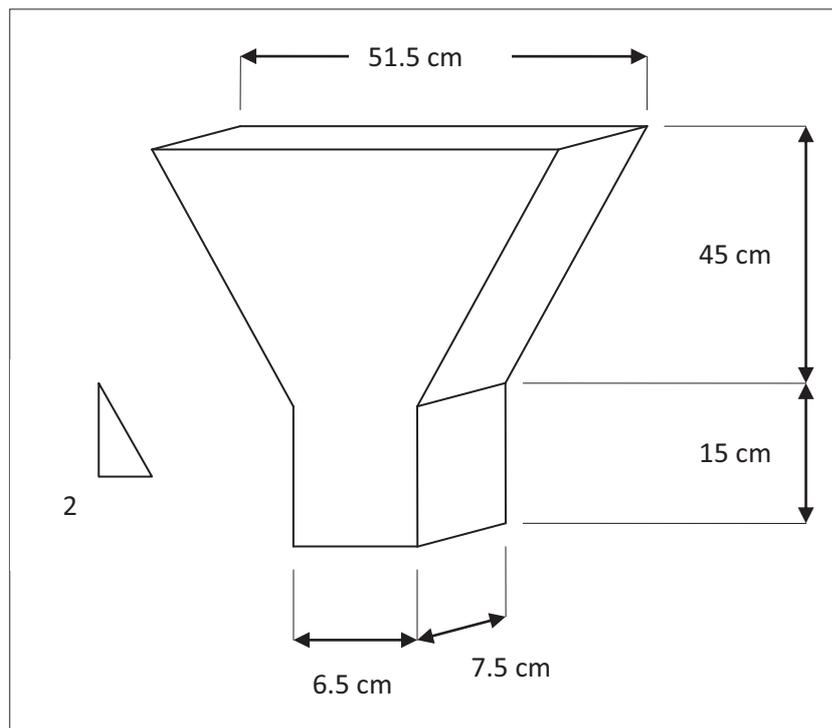


Figure II.4 Essai de l'entonnoir en forme de V d'après SAKATA [8]

II.2.2 Essai de tassement

Cet essai est réalisé sur des colonnes de béton de 70cm ou de 150cm de hauteur (Manai, 1995). Il s'agit de fixer une plaque circulaire en Plexiglas de 150mm de diamètre et de 4mm d'épaisseur ancrée dans le béton à l'aide de 4 boulons de 35mm de longueur chacun, sur la surface du béton frais.

On met au contact de la plaque en Plexiglas l'aiguille de 24mm de longueur d'un comparateur de détection de déplacement qui est caractérisé par une précision de $0.2 \mu\text{m}$. On note la variation du tassement au cours du temps jusqu'à la stabilisation du mouvement (prise de béton).

On détermine ainsi le tassement relatif T (%) par division de la valeur maximale du tassement (T_h) sur la hauteur de la colonne (h).

$$T(\%) = \frac{T_h}{h} \times 100$$

Cet essai nous permet également mesurer le volume d'eau de ressuage externe apparue à la surface supérieure du béton.

Une fois durcies, les colonnes de béton peuvent être sciées verticalement afin d'évaluer la répartition des gros granulats. Ceci nous donne une idée sur la résistance à la ségrégation du béton.

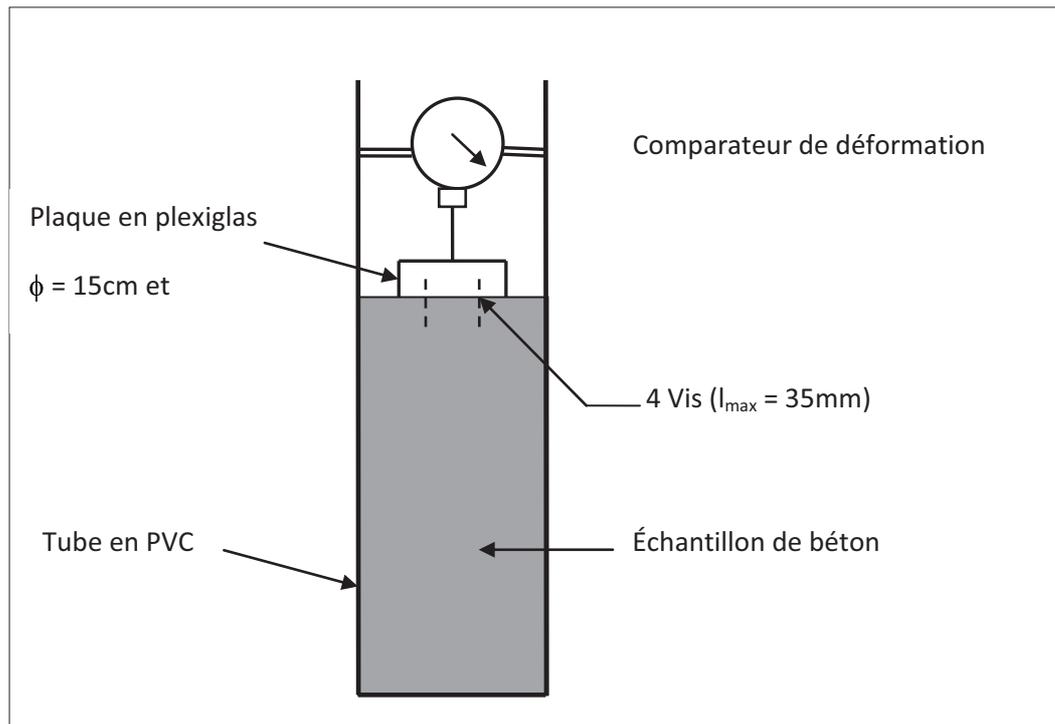


Figure II.5. Essai de tassement (MANAI, 1995). [11]

II.2.3 Ségrégation dynamique

Pour la ségrégation dynamique, comme pour la ségrégation statique, il n'existe pas d'essais conventionnels. De ce fait, plusieurs systèmes ont été développés.

Les essais pour caractériser la résistance à la ségrégation dynamique ont pour but d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent par exemple mettre en évidence des phénomènes de blocage de l'écoulement par formation de voûtes avec les granulats.

II.2.3.1 Essai du tube en U

Le tube en U (figure II.6.) est composé de deux régions séparées par une trappe. L'essai consiste à remplir la partie (1) puis ouvrir la trappe et laisser le béton s'écouler librement. Après écoulement on mesure la hauteur de remplissage dans la deuxième partie, celle-ci devrait être supérieure à 30 cm . [10]

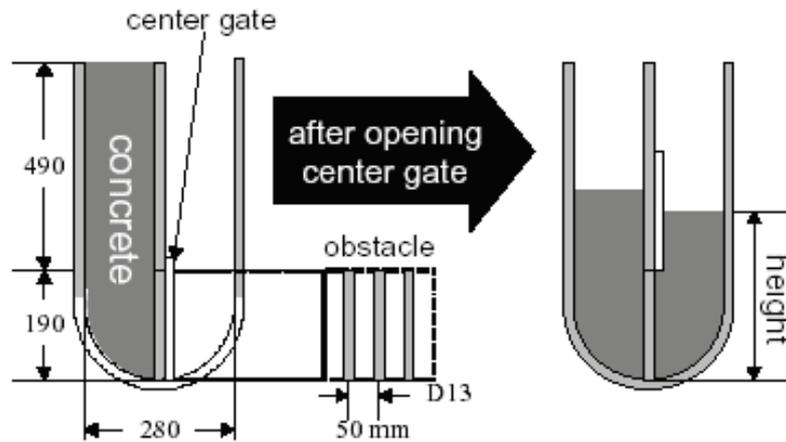


Figure II.6. Essai du tube en U [10]

II.2.3.2 Essai de la capacité de remplissage (Essai du caisson)

Il s'agit de remplir à débit constant le caisson jusqu'à ce que la partie Ω atteigne 22cm et on estime l'aptitude de remplissage du béton par le rapport $A/(A+B)$ (%).

Avec

A : rempli par le béton

B : non rempli par le béton.

Un béton peut être considéré comme autoplaçant si le rapport est supérieur à 60%. Le volume de béton autoplaçant nécessaire pour réaliser cet essai est de l'ordre de 35 litres.

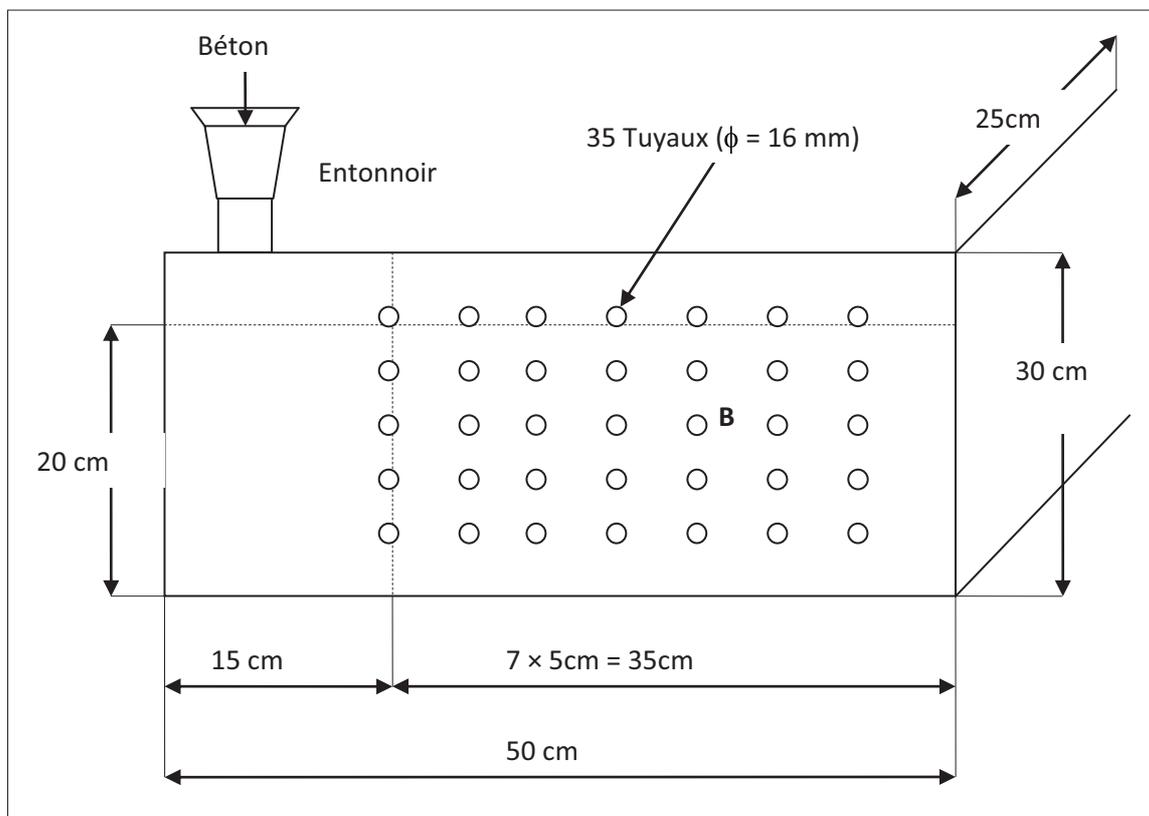


Figure II.7 : Essai du caisson, d'après YURUGI et al (1993). [8]

II.2.3.3 Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

L'essai consiste à verser 10 litres de béton dans un seau juste après le malaxage. Il faut couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation. Après 15 minutes, on verse au centre d'un tamis de 5mm d'ouverture un poids de béton égal à $4.8\text{kg} \pm 0.2\text{kg}$, avec une hauteur de chute du béton de $50 \pm 5\text{cm}$. Après 2 minutes, on calcule le poids de la laitance passée au tamis, ce qui nous permet de qualifier les BAP vis-à-vis des risques de ségrégation et de ressuage.

II.2.4 Ségrégation statique

Il est important d'évaluer la capacité du béton à rester homogène une fois mis en place, c'est à dire la résistance à la ségrégation statique des granulats qui ont une répartition hétérogène.

Les caractéristiques du béton telles que la résistance mécanique, le retrait et la qualité du parement peuvent être considérablement réduites dans un béton autoplaçant possédant une bonne résistance à la ségrégation.

II.2.4.1 Essai à la bille

On mesure l'enfoncement d'une bille simulant un granulat de diamètre de 20mm dans un cylindre de béton $16 \times 32\text{cm}$. La bille est reliée au balancier par une tige rigide et sa densité est ajustée par un contrepois.

La bille est initialement enfoncée de sa hauteur dans le béton puis lâchée. Plus le temps nécessaire pour que la bille s'enfonce dans le béton (de 6 cm pour les études du LCPC) est faible, plus la tendance à la ségrégation du matériau est élevée.

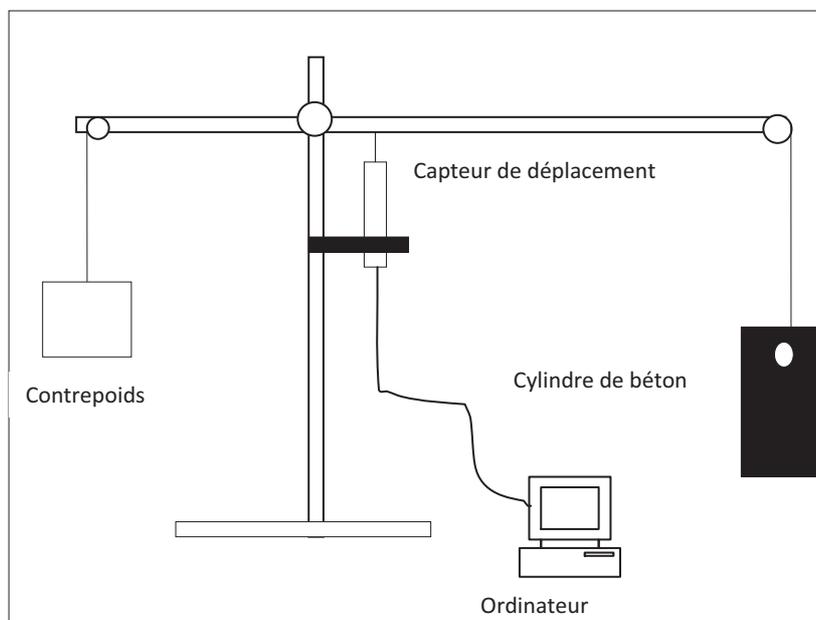


Figure II.8. Essai à la bille. [8]

II .3 Notion de déformabilité et capacité de remplissage

Le béton doit se déformer dans les coffrages pour contourner les obstacles qu'il peut rencontrer durant son écoulement. Cette déformation doit se faire sans qu'il y ait un risque de séparation de ses différents constituants. La capacité de remplissage d'un béton est un indice d'ouvrabilité qui nous renseigne sur la déformabilité, la cohésion et la résistance à la ségrégation d'un béton durant son écoulement (Ozawa et coll. 1992). [9]

En plus de la qualité du béton (composition et teneur en liant, rapport E/L, teneur en ajout chimique,...etc.), la capacité de remplissage est affectée par la forme des coffrages, l'espacement des armatures et la méthode de mise en place du béton.

Une étude expérimentale a été réalisée par Ozawa et coll. (1992) [9] pour évaluer la capacité de remplissage d'un BAP sous des conditions sévères.

L'essai, comme le montre la figure II.9 consiste à déverser 30 litres de béton autoplaçant dans un contenant cubique dont le fond contient un grillage ayant un maillage de 50mm. Le maillage est supposé simuler une zone fortement congestionnée d'un coffrage.

Une trappe empêche le béton de s'écouler avant le début de l'essai. On applique une pression uniforme de 0.1 kg/cm^2 sur toute la surface du béton et on ouvre la trappe. Lorsque l'écoulement cesse, on mesure la quantité du béton ayant traversé le grillage.

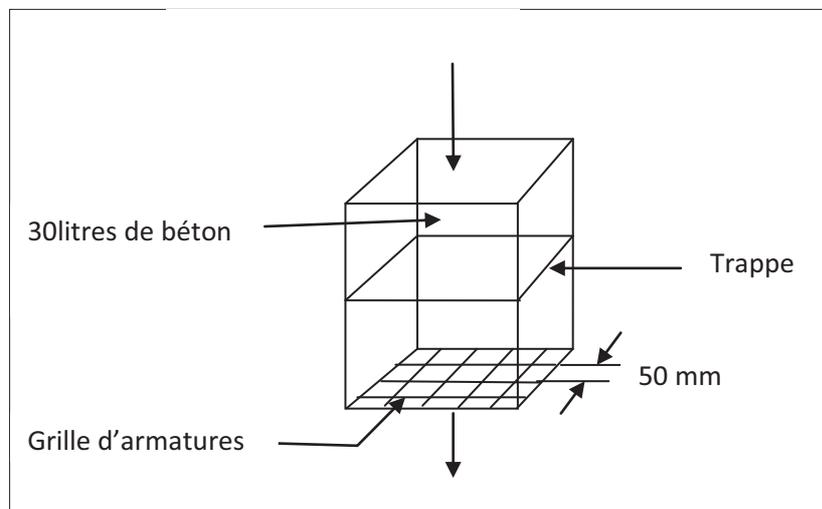


Figure II.9 : Essai de la boîte, capacité de remplissage (OZAWA et coll. 1992). [9]

La relation entre le volume du béton passant à travers le grillage et l'affaissement est présentée sur le graphe de la figure II.10:

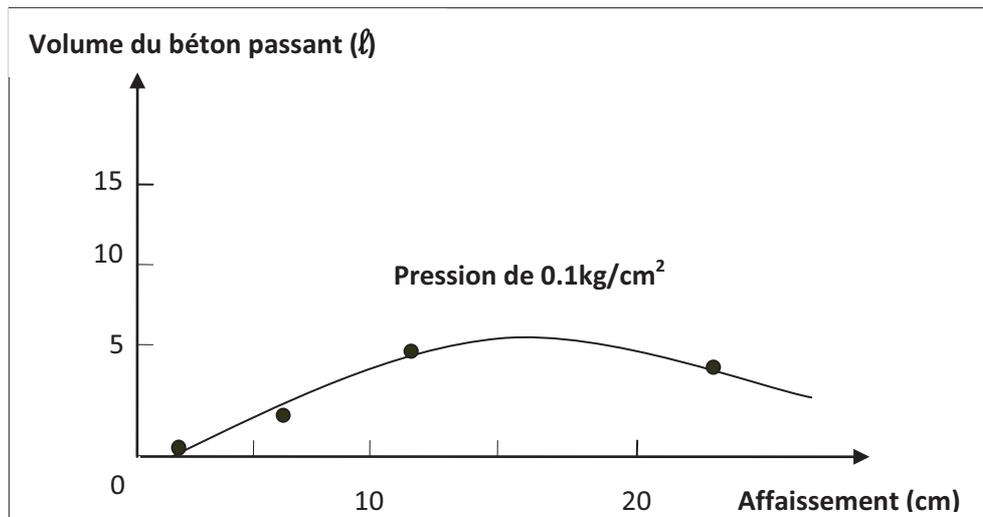


Figure II.10 : Variation du volume de béton passant en fonction de l'affaissement (Essai de la boîte, OZAWA et coll. 1992). [9]

Cette relation n'est en fait pas linéaire, mais elle possède plutôt un optimum. Pour les bétons à faible affaissement, il y a une difficulté d'écoulement à cause d'un manque de déformabilité.

Par contre, dans le cas des affaissements élevés, on assiste à un phénomène de ségrégation. Le béton possède une très faible viscosité et les granulats se séparent du mortier pour former des arches et bloquer l'écoulement.

II.4. Caractéristiques des BAP à l'état durci

II.4.1. Propriétés mécaniques des BAP

Les résistances mécaniques d'un BAP sont, comme pour la plupart des bétons, directement liées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment. Elles dépendent aussi de la composition du liant. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistances jusqu'à des BAP à hautes performances 80 à 100 MPa au 28ème jour.

L'évolution des résistances à la compression des BAP semble être voisine de celle des bétons ordinaires en raison de l'utilisation fréquente de fillers calcaires connus pour avoir un effet accélérateur sur l'hydratation des silicates de calcium. Aux très jeunes âges, les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de superplastifiants, un dosage trop élevé pouvant conduire à un retard de prise considérable.

Il est possible cependant d'atteindre des résistances mécaniques élevées au démoulage en optimisant le choix et le dosage en adjuvants. En fonction des propriétés pouzzolaniques

des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours.

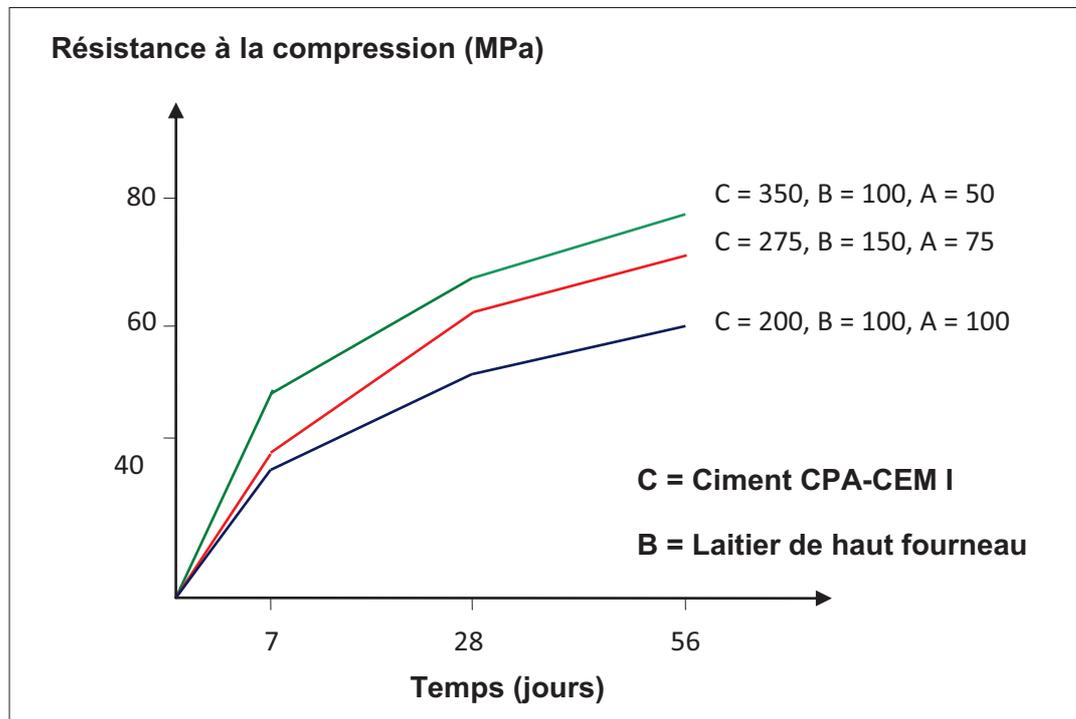


Figure II.11. Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant, d'après HAYAKAWA et al (1993). [8]

II.4.2. Le retrait

Tenant compte du volume de pâte plus important qu'ils contiennent, les BAP sont susceptibles d'être plus déformables que les bétons ordinaires. Les données de la littérature dans ce domaine montrent bien une tendance au retrait total plus importante pour les BAP.

Comme leur retrait endogène varie entre 180 et 250 $\mu\text{m}/\text{m}$, il semble être inférieur ou égal à celui des bétons ordinaires. Leur retrait de séchage est donc plus élevé (environ 800 $\mu\text{m}/\text{m}$).

Ce retrait de séchage est d'autant plus important que le rapport E/C est grand mais paraît d'autant plus faible que le rapport G/S est élevé.

II.4.3 Le fluage

Le fluage étant directement lié à la déformabilité de la matrice cimentaire, on peut s'attendre à ce que le volume de pâte des BAP, généralement supérieur à ceux des bétons ordinaires, conduise à des déformations de fluage importantes.

Selon PERSSON (1999) [8], le fluage des BAP augmente significativement lorsque les charges sont appliquées aux jeunes âges, et diminue lorsqu'il s'agit de BAP à hautes performances.

CHAPITRE III

Formulation d'un béton autoplaçant

Chapitre III

Formulation d'un béton autoplaçant

Introduction

Depuis son apparition, le béton autoplaçant a suscité beaucoup d'intérêt. Des chercheurs du monde entier se sont penchés sur le problème de formulation des BAP, et plusieurs méthodes ont été développées.

Nous nous proposons, dans un premier temps, de présenter le principe adopté pour ce genre de formulation, en citant les optimisations relatives à la composition de ces bétons. Dans un deuxième temps, nous présenterons quelques approches de formulation du béton autoplaçant avec les résultats des essais, issus de la littérature, effectués sur ces formulations. Enfin nous terminerons par une conclusion.

III.1 Principes de formulation

Les deux principales propriétés recherchées des BAP sont une grande fluidité et une grande résistance à la ségrégation.

Ces deux propriétés sont à priori contradictoires pour un béton ordinaire, l'obtention de l'une se fait au détriment de l'autre. La formulation d'un BAP requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, et l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

Les caractéristiques des BAP doivent assurer : [19]

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

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

Le facteur le plus important dans la formulation d'un BAP est l'eau. En effet le principe de ce type de béton est de diminuer la quantité d'eau utilisée tout en assurant une bonne maniabilité à l'état frais. La diminution de la teneur en eau conduit à de bonnes caractéristiques mécaniques telles que :

- une résistance plus élevée ;
- un fluage et un retrait plus faibles ;
- une durabilité accrue.

Beaucoup de recherches ont été faites sur l'optimisation et le développement de formulations de bétons autoplaçants. L'objectif principal de ces recherches est l'amélioration des performances du béton à l'état frais et durci.

Afin de concilier des propriétés en conflit, un esprit d'optimisation lors de la formulation s'avère plus qu'important pour satisfaire le cahier des charges de ce genre de bétons.

Nous allons tenter de résumer ces optimisations dans ce qui suit.

III.1.1 Optimisation des BAP

Pour confectionner un béton autoplaçant, on utilise souvent des adjuvants chimiques (super plastifiants, réducteurs d'eau, agents colloïdaux et agent entraîneur d'air) et des ajouts minéraux (fumée de silice, laitier, cendre volante et filler calcaire). Ce type de béton se caractérise par la diversité des matériaux cimentaires qu'il contient par rapport aux bétons ordinaires. Le béton autoplaçant contient également des proportions bien précises de gros granulats pour faciliter la déformabilité de la matrice cimentaire. [12]

L'étude de l'influence des différents adjuvants chimiques et ajouts minéraux et des dosages de gros granulats sur les propriétés des bétons fluides à l'état frais et durci a attiré l'attention de plusieurs chercheurs. Dans la partie suivante nous exposons les résultats de quelques recherches sur l'optimisation et le développement de formulation de bétons autoplaçants du point de vue de la teneur en granulats et en ajouts chimiques et minéraux.

Les objectifs principaux de ces recherches étaient l'amélioration de la rhéologie, des performances mécaniques et de la durabilité des bétons fluides.

III.1.1.1 Optimisation des gros granulats

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les quantités et la taille optimales des gros granulats capables de donner un maximum d'ouvrabilité au béton. Ces études ont analysé l'impact de cette optimisation du béton à l'état frais sur les propriétés des bétons durcis.

Selon Yurugi et coll. (1989) [17], le volume de gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage : plus la teneur en gros granulats augmente, plus la capacité de remplissage diminue.

Ayant comme critère de base qu'un béton autoplaçant devrait avoir un diamètre d'étalement compris entre 600 et 700 mm et plus de 60% de capacité de remplissage, les chercheurs ont en effet réalisé des formulations de bétons autoplaçants qui contenaient 30 à 40% de fillers calcaires, un agent colloïdal à base de naphthalène (dosage de 2.6 à 4% de la masse du liant), des granulats concassés ayant un diamètre maximum de 20mm et un rapport E/L = 0.3 à 0.35. Le diamètre d'étalement obtenu variait de 560 à 730mm.

Les résultats montrent que pour une proportion volumique de gros granulats par m³ variant de 31% à 34%, il est recommandé un rapport volumique sable sur pâte (S/P) de 65% afin d'obtenir un béton ayant une fluidité comprise entre 600 et 700mm d'étalement. D'autre part, pour une proportion (Gvol) inférieure à 33% on recommande un rapport S/P = 75%.

Ces bétons fluides ayant les quantités optimales en gros granulats ont développé de bonnes résistances aux cycles de gel-dégel (4% d'air entraîné). [17]

Christophe CHUCHE du MBT (Master Building of Technology) [18] a développé des bétons autoplaçants de 640 ± 40 mm d'étalement avec un rapport E/L de 0.34 à 0.5 et un rapport G/S de 0.7 à 1.05, dont le volume des granulats de la fraction 3/8 représente $65 \pm 4\%$ du volume des gros granulats.

Ces bétons contiennent une grande teneur en fines (éléments inférieurs à $315 \mu\text{m}$) jusqu'à 700 kg/m^3 , composées essentiellement de 500 kg/m^3 de liant.

Il a également utilisé un superplastifiant à base de polymère carboxylate avec des dosages variant de 1.1 à 2.4% de la masse du liant.

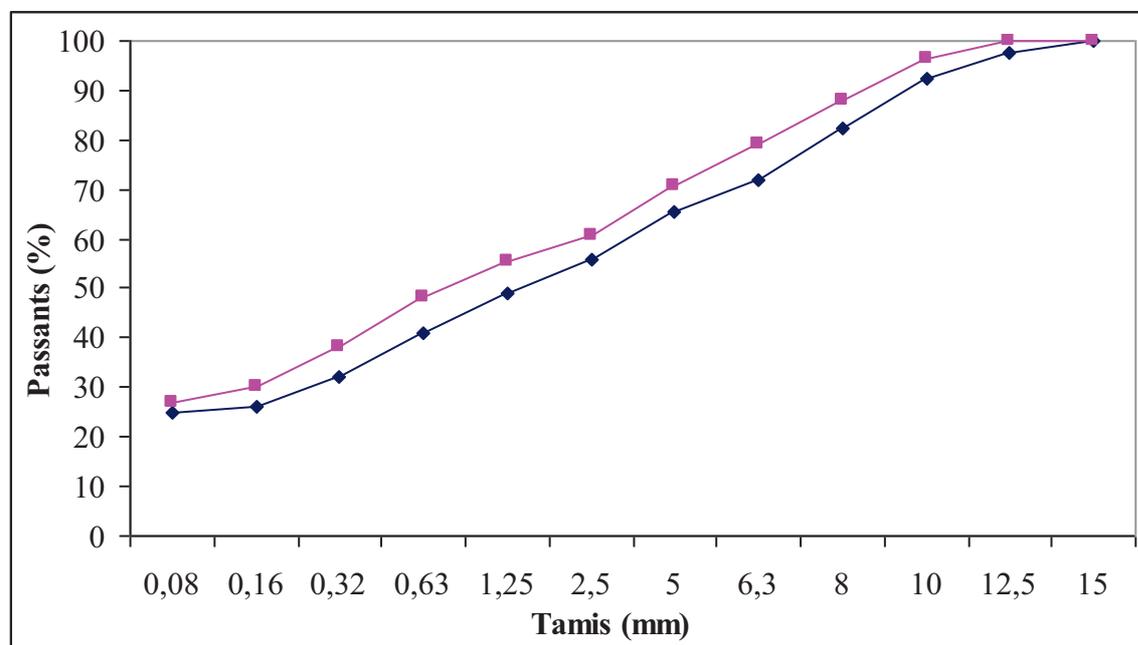


Figure III.1. Courbe de référence d'un béton autoplaçant, d'après MBT France. [18]

III.1.1.2 Optimisation des teneurs en ajouts minéraux

L'utilisation des ajouts minéraux est intéressante sur le plan rhéologique, car ils sont d'une part moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et, d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet aussi d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton. Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton. D'autre part, le grand volume de liant utilisé dans les bétons autoplaçants pour remplacer une partie de ciment contribue à la réduction de la chaleur d'hydratation et du retrait du béton. [12]

Sur le plan mécanique, Mitsutaka et coll. (1993) [3] trouvent que les résistances à la compression de certains BAP (étalement de 650 ± 50 mm) sont en général supérieures à 40 MPa après 28 jours parce que ces bétons contiennent une grande teneur en fines (500 kg/m^3) composées essentiellement de ciment portland (200 à 350 kg/m^3), de laitier (100 à 200 kg/m^3) et de cendres volantes (50 à 100 kg/m^3).

La résistance est aussi élevée grâce aux rapports E/C relativement bas (0.35 et 0.40). Il est à noter que ces bétons contiennent 9.6 kg/m^3 de superplastifiant (naphtalène) et 1 kg/m^3 d'agent colloïdal (polysaccharide). La résistance à la compression au jeune âge est plus faible avec les hautes teneurs de remplacement en pouzzolanes (200 kg/m^3 de laitier et 100 kg/m^3 de cendre volante) qui réagissent lentement. Toutefois, les mélanges qui présentent une teneur élevée en ciment (350 kg/m^3) ont eu des résistances plus élevées. [3]

III.1.1.3 Optimisation des teneurs en ajouts chimiques

L'utilisation des superplastifiants et des agents colloïdaux permet d'améliorer aussi bien la déformabilité que la stabilité des BAP. Les superplastifiants permettent de réduire la teneur en eau et par conséquent, améliorent la stabilité, les propriétés mécaniques, et la stabilité du béton autoplaçant.

Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquiescer des charges identiques et de créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ceci permet de libérer une partie de l'eau piégée par les grains de ciment floculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton. [13]

Les agents colloïdaux améliorent la viscosité et diminuent la ségrégation et le ressuage dans les bétons ; par contre, ils augmentent la demande en eau du mélange et leur utilisation nécessite la présence de superplastifiants. Les agents colloïdaux maintiennent aussi l'uniformité du béton au cours de sa déformation en évitant l'accroissement local des contraintes dû au rapprochement des gros granulats. [12]

Khayat et Guisani (1996) [3] ont montré aussi que la stabilité du béton s'accroît avec l'augmentation de la teneur en agent colloïdal. On assiste à une diminution du taux de ressuage externe et du tassement à l'état frais du béton.

III.2. Méthodes de formulation

III.2.1 Formulation par la méthode japonaise de Okamura

Okamura et al, ont présenté une méthode simple de composition des BAP qui a pour objectif de faire un béton commun pour toutes les centrales à béton.

Avec cette méthode, les quantités de granulats fins et gros restent les mêmes, c'est la proportion eau/poudre et le dosage des adjuvants qui sont ajustés jusqu'à obtenir l'autoplaçabilité.

Cette méthode se base sur les paramètres suivants : [19]

- la quantité des gros granulats est fixe et le volume absolu est égal à 50% du volume solide. Pour des quantités supérieures à 50%, l'autoplaçabilité échoue souvent ;
- le rapport eau/poudre, en volume, doit être compris entre 0,9 et 1, selon les propriétés de la poudre ;
- le dosage en superplastifiant et le rapport final eau/poudre sont déterminés en fonction de la réalisation des mélanges expérimentaux et des essais d'autoplaçabilité préalables.

Récapitulation

Gros	Fins	Eau SP Filler
50% du volume de solide	40% de volume de mortier	Valeurs obtenues par les essais expérimentaux

III.2.2 L'approche suédoise [Petersson et AL 1996]

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

Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G/S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées. [12]

Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante et la 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.

III.2.3 L'approche de la JSCE

Cette méthode a été proposée par la Japanese Society of Civil Engineers en 1998, après plusieurs recherches et applications pratiques.

Elle utilise 2 types de bétons autoplaçants :

- des bétons de type « poudre » où l'autoplaçabilité est fonction de la quantité de poudre présente dans le mélange,
- des bétons « type agent de viscosité » où l'autoplaçabilité est fonction du dosage de l'agent de viscosité.

Selon le type de béton considéré, la quantité d'eau, le rapport eau/poudre et la quantité de poudre varient.

Les principaux résultats obtenus par cette méthode sont:

- la quantité de gros granulats, en volume, doit être comprise entre 0,30 et 0,32 m³/m³ de béton. la dimension maximale du granulats est limitée à 20 ou 25mm ;
- la quantité d'eau, si on parle d'un béton type « agent de viscosité », doit être ≤180kg/m³ de béton et examinée pour chaque type d'agent de viscosité. Si on parle d'un béton type « poudre », la quantité d'eau doit être comprise entre 155 et 175kg/m³ ;

- le rapport massique eau/poudre, pour le béton « type poudre », doit être compris entre 28 et 37%. pour le béton « type agent de viscosité », la quantité de poudre doit être comprise entre 0,16 et 0,19m³/m³ de béton ;
- le volume de vides dépend du diamètre maximum du gros granulat, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4,5% d'air ;
- la quantité de granulats fins se déduit des quantités précédentes (gros granulats, poudre, eau et air) ;
- les quantités d'adjuvant sont recommandées par les fabricants. Le dosage en agent de viscosité est très variable selon la nature de l'agent et le type de béton (avec ou sans ajout de fines). Le pourcentage de certains agents de viscosité par rapport à la quantité d'eau est donné ci-dessous :

- ✗ agent cellulosique : 0,15 à 0,30%
- ✗ agent acrylique : 3 à 5%
- ✗ agent glycol : 2 à 3%
- ✗ agent polysaccharide soluble : 0,05%

III.2.4 Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC [De Larrard et al 1994]

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

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

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

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

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

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

Exigences du cahier des charges

La formulation d'un béton se fait à partir d'un cahier de charges.

Dans le cas des BAP les critères exigés sont les suivants :

- Etalement : 600 à 700 cm
- Viscosité plastique : supérieure à 100Pa.s pour éviter la ségrégation et inférieure à 200Pa.s pour un coulage rapide

Il faut aussi connaître :

- La résistance à la compression souhaitée à 28jours
- L'environnement de bétonnage qui traduit un confinement potentiel, il faut tenir compte de l'effet de paroi (espacement des armatures).

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

- La compatibilité ciment –super plastifiant
- La compatibilité super plastifiant –agent de viscosité
- La nature des additions minérales (fumées de silices, laitiers, fillers calcaire)

Détermination des proportions des constituants

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

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

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

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

III.2.5 Méthode basée sur un plan d'expérience [19]

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 aux objectifs ciblés, par exemple.

III.3 Exemples de formulations

Le tableau III.2 présente différentes compositions obtenues avec différentes approches. [16]

Tableau III.1 : Exemples de formulations de BAP. [16]

Constituants (kg/m ³)	Approche japonaise	Min. pâte	Approche japonaise	Min.pâte
G 10/14	0	0	436	721
G 6/10	873	917	436	211
Sable	704	813	704	827
Ciment	400	350	400	350
Filler	330	210	330	220
Eau	170	170	170	170
Adjuvant	74	57	74	57
Vpâte (litre)	424	364	424	368
G/S	1,24	1,13	1,24	1,13
VG/VS	1,08	0,97	1,08	0,97
E/L	0,23	0,31	0,23	0,26
Étalement	75	72	74	68
H1/H2	0,82	0,3	0,85	0,4
Laitance	13,8	1,2	1,5	2,6

Les dosages y compris ceux des adjuvants sont exprimés en (kg/m³).

Tableau III.2: Exemple de formulation des BAP fabriqués en France. [5]

CONSTITUANTS	FORMULATIONS (kg/m ³)			
	BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4
Ciment CPA 52.5	350	452	372	430
Sable 0/5	860	544	891	750
Gravillon 5/12	790	290	306	860
Gravillon 12/20	/	554	585	
Fumée de silice	/	36	30	15
Filler calcaire	140	/	/	/
Superplastifiant	8	10	16	10
Eau totale	200	180	169	175
f _{c28} (MPa)	37	57.3	64.8	65

Tableau III.3 : Formulation de BAP et bétons ordinaires vibrés, réalisés et caractérisés par PERSSON. [14]

	BÉTON AUTOPLAÇANT				BÉTON ORDINAIRE			
	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BT1	BT2	BT3	BT4
Ciment (C)	500	400	340	260	389	360	285	250
Eau (E)	133	153	170	207	126	137	142	200
Fumée de silice (FS)	50	/	/	/	/	/	/	/
Filler siliceux (F)	50	145	165	185	106	68	33	/
Sable 0/8 mm	880	790	840	1000	694	780	860	1000
Gravillon quartzite 8/11 mm (G)	600	305	285	395	135	270	330	300
Gravillon quartzite 11/16 mm (G)	800	620	525	270	660	560	420	600
Superplastifiant avec agent de viscosité	5	2	1.2	1	/	/	/	/
Superplastifiant sans agent de viscosité	/	/	/	7	3.6	2.6	.93	/
Réducteur d'eau	/	/	/	/	1.7	0.9	1.1	/
Entraîneur d'air	/	/	0.024	/	0.05	0.045	0.027	/
Liant (L)*	600	545	505	445	495	428	318	250
G/S	0.98	1.17	0.96	0.67	1.15	1.06	0.87	0.9
E/L	0.22	0.28	0.34	0.47	0.25	0.32	0.45	0.8
Air occlus	1.3	1.4	3.5	1.9	12	12	13	1.2

III.4 Conclusion

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

- la première étape dans une formulation est la caractérisation des matériaux utilisés, et leur interaction ;
- sachant que d'une part la compacité d'un gravillon est fonction de sa forme : un gravillon anguleux ou plat a une compacité plus faible qu'un gravillon arrondi, et d'autre part que la fluidité et le risque de blocage du béton dépendent de la forme des gravillons, il est donc judicieux de doser le gravillon à partir de sa compacité ;
- la méthode japonaise a montré qu'il existe une corrélation entre le comportement d'un BAP à l'état frais et son mortier. Il est donc préférable d'effectuer des essais sur mortiers dans un laboratoire que des essais sur béton, en centrale à béton.
- pour répondre aux exigences de fluidité, caractérisées par la boîte en L, on peut jouer sur la quantité de pâte du béton, sachant qu'une augmentation de la quantité de la pâte implique un accroissement de la fluidité ;
- la méthode d'optimisation du squelette granulaire a permis de montrer que les granulats anguleux et denses nécessitent un volume plus grand de la pâte pour assurer la stabilité, leur écoulement et éviter le phénomène de blocage.

CHAPITRE IV

Fabrication, transport et mise en place des BAP

Chapitre IV

Fabrication, transport et mise en place des BAP.

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP.

Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier.[9]

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

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

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier.

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire.

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

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

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

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

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

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

Deuxième Partie

Partie Expérimentale

CHAPITRE V

Objectifs de l'etude

Chapitre V

Objectifs de l'étude

INTRODUCTION

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

Pour cela nous avons choisi de faire varier la quantité de ciment en la remplaçant par des fillers (par substitution) en maintenant le rapport E/L et le dosage en superplastifiant constant pour un même type de béton.

Les essais sur béton frais et durci ont été réalisés au sein du laboratoire du Algerian Concrete Technology (ACT) d'El Hamiz après que l'identification préalable des matériaux eut été effectuée au LCTP (Hussein-Dey)

VARIABLES DE L'ÉTUDE

Granulats :

Tous les bétons testés ont été élaborés avec les mêmes granulats :

Gravier calcaire (lavé) de BOUZEGZA de classes 3/8 et 8/15

Sable roulé lavé d'AKBOU de classe 0/3

Sable roulé lavé de BOUSAADA de classe 0/1

Ajouts utilisés :

Superplastifiant Glenium 26

Filler calcaire, F50 fourni par l'entreprise ENG

Paramètres à varier :

Dosage en superplastifiant

Présence d'ajout minéral (fillers)

Dosage en fillers

Bétons élaborés

- ❖ BAP1 sans ajouts minéraux avec un dosage en super plastifiant de 1.4%C, avec E/C = 0.38
- ❖ BAP2 sans ajouts minéraux avec un dosage en super plastifiant de 1.8%C, avec E/C = 0.38
- ❖ BAP3 avec filler calcaire, dosage 5% C et un dosage en super plastifiant 1.8%C avec E/L=0.38
- ❖ BAP4 avec filler calcaire, dosage 10% C et un dosage en super plastifiant 1.8%C avec E/L=0.38
- ❖ BAP5 avec filler calcaire, dosage 15% C et un dosage en super plastifiant 1.8%C avec E/L=0.38

Dans ce cadre :

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

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

Objectifs de l'étude :

Les essais effectués sur chacun de ces bétons à l'état frais et à l'état durci ont pour objectifs d'étudier l'influence de :

- La variation du dosage en superplastifiant
- La présence d'un ajout minéral
- La variation du dosage de l'ajout

sur les performances des BAP, et plus particulièrement sur leurs résistances mécaniques.

CHAPITRE VI

Procédure expérimentale

Chapitre VI

Procédure expérimentale.

VI.1 IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX

Avant d'entamer une formulation il est nécessaire de connaître les matériaux utilisés à cet effet. Leurs caractéristiques sont déterminées au moyen d'un certain nombre d'essais, dont la plupart sont normalisés. La convenance de ces matériaux étant établie grâce aux spécifications réglementaires. [20]

VI.1.1 Essais sur granulats

VI.1.1.1 Échantillonnage (NF P18-553)



Photo VI.1: Echantillonneur. [21]

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

VI.1.1.2 Analyse granulométrique :

Il s'agit de fractionner le matériau au moyen d'une série de tamis pour déterminer sa classe [21]. Les analyses granulométriques établies pour chaque fraction sont présentées dans les tableaux VI.1, VI.2, VI.3 et VI.4

Tableau VI.1 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Gravier 3/8			
Poids de l'échantillon : 1500g		Fond de tamis : 1492 g	
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
10			100
8	5.5	0.63	99.37
6	400	26.66	73.34
5	864	57.6	42.4
2.5	1492	100	

Tableau VI.2 : Analyse granulométrique du gravier 8/15.

Gravier 8/15			
Poids de l'échantillon : 3000g		Fond de tamis : 2996 g	
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
20			100
16	405	13.5	87.32
12.5	757	25.23	71.98
10	2246.5	74.88	17.30
8	2871.5	95.71	1.41
6	2996	100	

Tableau VI.3 : Analyse granulométrique du sable (0/1)

Sable 0/1			
Poids de l'échantillon : 1000 g		Fond de tamis : 1000 g	
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
1.25	15	1,5	98,5
0.6	25	2,5	97,5
0.3	159	15,9	84,1
0.15	831	83,1	8,85
0.07	996	100	

Tableau VI.4 : Analyse granulométrique du sable (0/3)

Sable 0/3			
Poids de l'échantillon : 1000g		Fond de tamis : 1000 g	
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8			100
6	6.5	0,65	9,35
5	22	2,2	97,8
2.5	275	27,5	72,5
1.25	550	55	45
0.6	733	73,3	26,7
0.3	841.3	84,13	15,87
0.15	959	95,9	4,1
0.07	980	100	

VI.1.1.3 Densités (absolue et apparente) :

La densité absolue est le rapport de la masse volumique absolue à la masse d'un égal volume d'eau, alors que la densité apparente est le rapport de la masse volumique apparente à la masse d'un égal volume d'eau

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

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

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

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

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

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

La masse du granulat désigne la masse de ses grains. Cela signifie que le granulat doit être sec.

a) Densités apparentes :

En laissant tomber du gravier d'une dizaine de centimètres et sans le tasser dans un récipient de deux litres, le volume apparent de l'échantillon de gravier vaut 2 litres. Le récipient doit être arasé avec une règle par mouvement de va et vient.

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

La masse volumique apparente représente le rapport entre cette masse et le volume apparent correspondant.

**Photo VI.2** Essai de densité apparente

(étape1)

**Photo VI.3** Essai de densité apparente

(étape2)

Tableau VI.5: Densités apparentes

Granulat	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Sable 0/1	Sable 0/3	Filler
Densité apparente	1,45	1,42	1,53	1,64	1,2

b) Densités absolues :

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

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

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

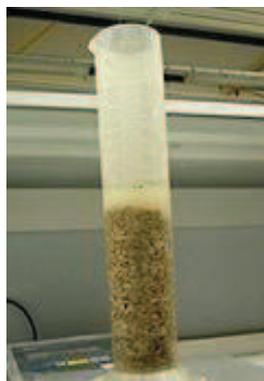
**Photo VI.4.** Essai de densité absolue

Tableau VI.6. Densités absolues

Granulat	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Sable 0/1	Sable 0/3	Filler
Densité absolue	2,5	2,6	2,5	2,54	2,2

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

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

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

$$\text{Cab}(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

Avec :

M_2 : Poids de l'échantillon déshydraté ;

M_1 : Poids de l'échantillon après saturation.

Le tableau VI.7 résume les résultats obtenus.

Tableau VI.7 : Coefficients d'absorption et porosités

Granulat	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Coefficient d'absorption (%)	0.6	0.6
Porosité	0.45	0.42

VI.1.1.5 Coefficient Los Angeles (NF P 18-73)

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

L'essai de Los Angeles se pratique sur les classes granulaires 4/6.3 ou 6.3/10 ou 10/16.

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

Le coefficient Los Angeles est calculé par la formule suivante :

$$LA = \frac{P \times 100}{5000}$$



Photo VI.5 : Appareil de Los Angeles

Tableau VI.8 : Résistance à la fragmentation (LA)

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

VI.1.2 Essais sur sable :

VI.1.2.1 Module de finesse (NF P18-304) :

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

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

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

Le module de finesse est défini par le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5. Le tableau VI.10 présente les résultats obtenus.

Tableau VI.9. Module de finesse du sable

Granulat	Sable 0/1	Sable 0/3	Spécifications
Module de finesse M_f	1.1	3.3	2,8 < M _f < 3,2 sable grossier 2,2 < M _f < 2,8 sable moyen 1,8 < M _f < 2,2 sable fin

VI.1.2.2 Équivalent de sable (NF P18-533):

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

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

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

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable tamisé avec un tamis de 2.5 mm dans une éprouvette normalisée remplie par une solution flocculante ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H₁) et du sédiment + flocculant (H₂).

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

$$ES = \frac{H_1}{H_2} \times 100$$

L'essai a donné le résultat présenté dans le tableau VI.10.

Tableau VI.10: Valeurs de l'équivalent de sable

Granulat	Sable 0/1	Sable 0/3	Spécifications
Equivalent de sable %	61	80	70 à 80 pour un sable roulé > 65 pour un sable concassé

VI.1.3 Essais sur ciment :

VI.1.3.1 Résistance mécanique du ciment (NF EN 196-1):

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

L'essai consiste à prendre 450 g de ciment, 1350 g de sable normalisé et 225 ml d'eau. On verse le ciment dans le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 30'' et on introduit le sable régulièrement pendant 30'' On met le malaxeur à sa vitesse rapide pendant 30'' puis on passe au moulage des éprouvettes dans des moules prismatiques 16×4×4 cm. Le démoulage se fait après 24 heures.

On place le prisme dans le dispositif de flexion avec face de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci et on procède à l'essai de flexion sur le prisme en appliquant la charge à raison de 50 N/S puis on place les deux demi prismes obtenus en flexion dans le dispositif de compression en le centrant par rapport aux plateaux de la machine et on procède à l'essai en appliquant la charge à raison de 2400 N/s et on note les valeurs observées des charges de rupture.

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

Tableau VI.11: Différentes classes de ciment

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

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

Résistance à la compression à 2 jours = 15 N/mm² ≥ 12,5
 Résistance minimale à la compression à 28jours = **44,5 N/mm²** > 42,5
 Résistance maximale à la compression à 28jours = **49 N/mm²** < 62,5
 Ces résultats permettent de classer le ciment en **classe : 42,5**

VI.1.3.2 Temps de prise (NF P15-473):

La mesure du temps de prise se fait sur un mortier à l'aide de l'appareil de Vicat.
Temps de prise = fin de prise – début de prise.

VI.1.3.2.1 Essai de consistance :

L'essai consiste à déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage des ciments. Il se fait à l'aide de l'appareil de Vicat (Photos VI.6 et VI.7).

On réalise un échantillon de pâte de ciment (500g de ciment + eau) pour les teneurs en eau suivantes : (22% 23% 24% 25% 26% 27% 28%) et on note à chaque fois la distance de la sonde du fond du moule à la fin de la pénétration

La distance entre 5 et 7 cm correspond à la quantité d'eau optimale



Photo VI.6 Essai de consistance

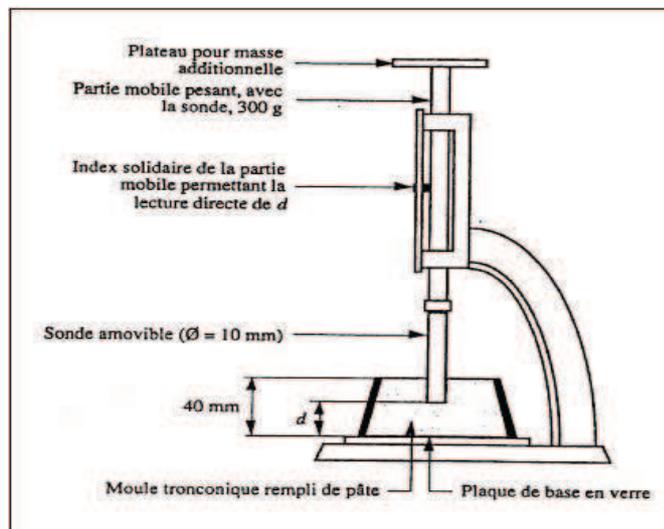


Photo VI.7 : Appareil de Vicat

Tableau VI.12: Quantité optimale d'eau

Ciment	500	500	500	500	500
Eau (%)	22	23	24	25	26
Distance de la sonde du fond d (mm)	18	15	14	11	6

Les résultats présentés dans ce tableau permettent de conclure que la quantité d'eau optimale est 26 %

VI.1.3.2.2 Essai de prise :

Cet essai consiste à déterminer le temps de début de prise et le temps de fin de prise

On prépare un échantillon de pâte de ciment (500g de ciment + eau) pour la teneur en eau trouvée dans l'essai de consistance et on note le temps du début de l'essai, mais cette fois on utilise l'aiguille de Vicat à la place de la sonde et on note la distance de l'aiguille du fond. Le temps qui correspond au moment où l'aiguille s'arrête à une distance comprise entre 3 et 5 mm est le temps du début de prise.

Après on retourne le moule sur sa petite base cette fois pour calculer la distance de pénétration de l'aiguille. Le temps d'une pénétration de 0.5 mm correspond au temps de fin de prise.

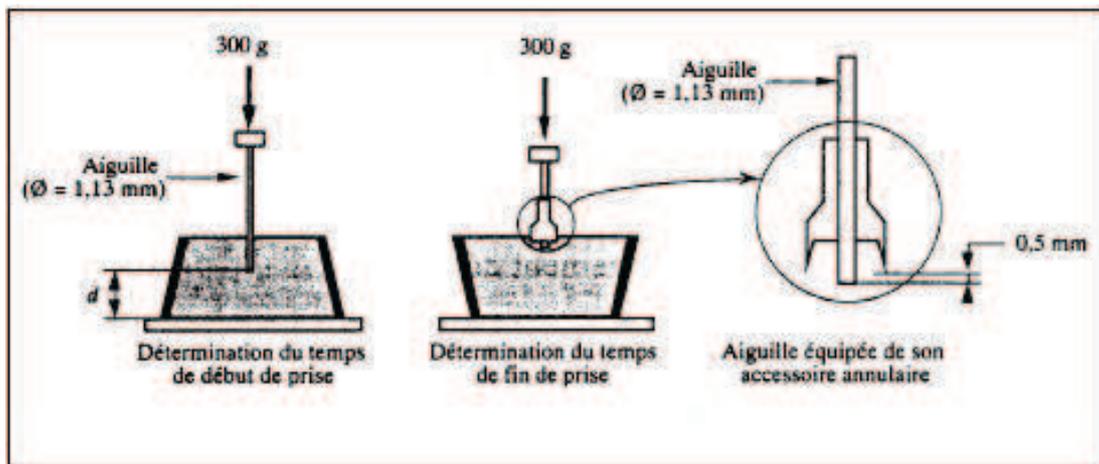


Photo VI.8 Temps de prise

Les résultats obtenus après essai sont:

Durée de l'essai : de 12h30 à 16h25

Début de prise : 14h30

Temps de début de prise : 2h > 60 minutes

Temps de prise : 3h55

La durée du temps de prise (120mn > 60mn) confirme la classe du ciment obtenue pour les résistances.

VI.1.3.3 Analyse chimique :

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

- Silice SiO₂
- Oxyde d'alumine..... Al₂O₃
- Oxyde de fer..... Fe₂O₃
- Chaux..... CaO
- Magnésie..... MgO
- Anhydride sulfurique..... SO₃

Les résultats obtenus pour l'analyse chimique du ciment sont résumés dans les tableaux VI.13.

Tableau VI.13. Composition chimique du ciment

Composition chimique (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
20,11	5,03	4,32	62,16	1,63	2,07

Les résultats analytiques intermédiaires sont :

- Anhydride carbonique..... CO₂
- Eau de constitution..... H₂O
- Insoluble..... INS
- Carbonates CaCO₃

Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux VI.14

Tableau VI.14. Résultats analytiques intermédiaires

Composition chimique (%)			
CO ₂	H ₂ O	INS	CaCO ₃
2,93	0,19	0,77	6,67

La composition chimique ne suffit pas pour caractériser un ciment. Il est nécessaire de connaître les composés minéralogiques constitués lors de la fabrication du ciment à partir des composés chimiques. On utilise les formules de Bogue.

Les formules de Bogue sont utilisées mondialement pour calculer la composition minéralogique d'un clinker ou d'un ciment Portland. Ce calcul fait l'hypothèse de la formation de réseaux cristallins bien définis, sans aucune inclusion étrangère, et ne tient pas compte des oxydes secondaires apportés par les matières premières. Pour un clinker Portland ordinaire, la composition minéralogique est définie par les formules suivantes et calculée à partir de la composition chimique.

Les principaux composés minéralogiques formés sont :

- Silicate tricalcique : (3CaO SiO₂) noté C3S
- Silicate bicalcique :(2CaO SiO₂) noté C2S
- Aluminate tricalcique : (3CaO Al₂O₃) noté C3A
- Alumino-ferrite tétracalcique (4CaO Fe₂Al₂O₃) noté C4AF

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

- $C3A = 2,65 Al_2O_3 - 1,69 Fe_2O_3$
- $C3S = 4,07 CaO - 7,60 SiO_2 - 6,72 Al_2O_3 - 1,43 Fe_2O_3 - 2,85 SO_3$
- $C2S = 2,87SiO_2 - 0,754 C3S$
- $C4AF = 3,04 Fe_2O_3$

Le tableau VI.15 donne le résultat de l'analyse minéralogique du ciment.

Tableau VI.15.Composition minéralogique du ciment

Composition minéralogique %			
C3A	C3S	C2S	C4AF
6,02	54,28	16,79	13,13

VI.1.4 Caractéristiques des ajouts :

Les caractéristiques des ajouts utilisés ont été données dans la fiche technique fournie avec les produits.

VI.1.4.1 Le superplastifiant :

Caractéristiques

Aspect	liquide
Couleur	brun
Masse volumique	$1,08 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$
pH	$7,0 \pm 1$
Teneur en chlorures	$< 0,1\%$
Extrait sec	$24 \pm 2 \%$
Na₂O eq	$< 2 \%$
Transport	non classé
Etiquetage	Pas de symbole exigé

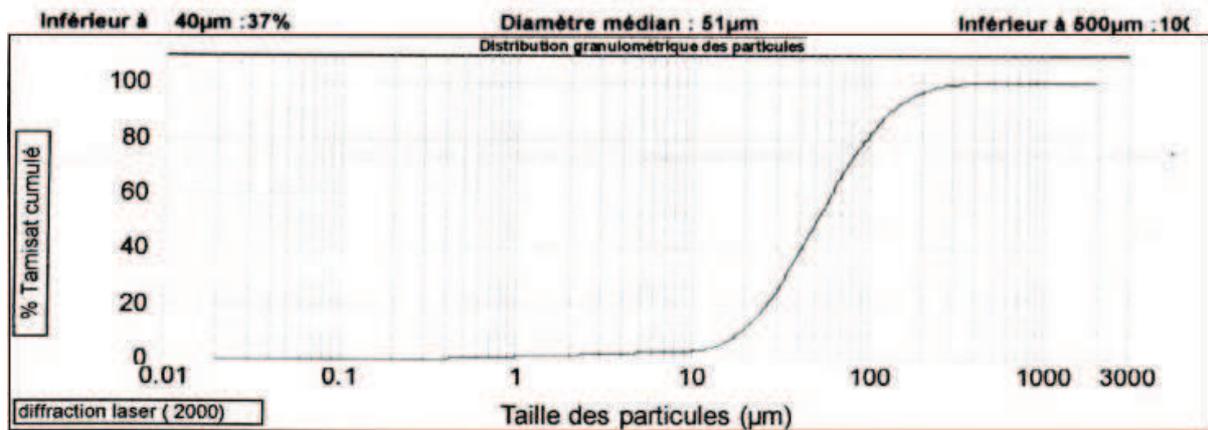
VI.1.4.2 Les fillers :

Caractéristiques chimiques

CaCO ₃	98%
CaO	55,18%
SiO ₂	0,06%
Na ₂ O	0,07%
MgO	0,59%
Al ₂ O ₃	0,07%
Fe ₂ O ₃	0,03%
Perte au feu	43%
Ph	9

Caractéristiques physiques

Dureté (MOHS) :	3
Poids spécifique :	2,7
Densité apparente non tassée:	1,31gr/cm ³
Indice de réfraction :	1,71
BLancheur (CR310 MINOLTA) :	L: 90.98a+0.48 b+

Répartition granulométrique

VI.2 Élaboration des bétons :

Pour la formulation du béton autoplaçant nous n'avons pas suivi une formulation classique.

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

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

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

Pour les BAP le dosage du ciment est en général compris entre 350 et 400 kg/m^3 . Dans notre cas on a choisi de prendre 400 kg/m^3 pour les BAP sans fillers après on remplace une quantité de ciment par des fillers (par substitution).

VI.2.1 Formulation du béton autoplaçant sans fillers

VI.2.1.1 Avec une variation du dosage en superplastifiant :

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

- ◆ G/S = 1 pour augmenter la quantité de sable, ce qui permet d'assurer une meilleure stabilité et une quantité suffisante de mortier.
- ◆ E/C = 0,38, le dosage en ciment étant constant, la diminution de ce rapport de 0,5 à 0,4 s'explique par une diminution de la quantité d'eau tenant compte de la présence de superplastifiant
- ◆ Le volume d'air occlus (A) est de l'ordre de 5%

Dans 1 m^3 de béton on a les constituants suivants :

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

Avec :

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

$$* E/C = 0,38 \text{ avec } C = 400 \text{ kg}/\text{m}^3 = (400/3,1) \text{ l}/\text{m}^3 = 129,03 \text{ l}/\text{m}^3$$

$$\text{On a donc } E = 152 \text{ l}/\text{m}^3$$

$$\text{On obtient alors } G + S = 1000 - 50 - 129,03 - 152 = 668,97 \text{ l}$$

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

$$G = S = 334,48 \text{ l}/\text{m}^3$$

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

Pour les deux fractions du sable on doit jouer sur le module de finesse et on procède comme suit :

Le module de finesse désiré est 2.6 avec $Mf_{0/1} = 1$ et $Mf_{0/3} = 3.3$ donc

$$S_{0/3} = (2,6 - 1) / (3,3 - 1) = 0.70$$

$$S_{0/1} = (3,3 - 2,6) / (3,3 - 1) = 0.30$$

Donc pour les deux fractions du sable on prend 70% de 0/3 et 30% du 0/1.

On obtient la formulation présentée dans le tableau VI.16

Le dosage en superplastifiant a été varié : 1,4% C et 1,8% C.

Tableau VI.16. Composition des BAP1 et BAP2.

Composant	Composant (Volume [l/m ³])	Densité absolue	Composant (Masse [kg/m ³])
Gravier 3/8	167,24	2,5	418,1
Gravier 8/15	167,24	2,6	434,82
Sable 0/3	234,13	2,54	594,69
Sable 0/1	100,7	2,5	251,75
Ciment	129,03	3,1	400
Eau	152	1	152
Superplastifiant 1,4%C	5,18	1,08	5,6
Superplastifiant 1,8%C	6,66	1,08	7,2

VI.2.2 Formulation du béton autoplaçant avec fillers :

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

On a alors les formulations suivantes à différents dosages en fillers (5% ,10%

et 15%) avec soustraction du ciment de la quantité correspondant au filler

a - Dosage en fillers de 5% C :

Si on prend un dosage en filler de 5% C on a :
 $Fi = 5\% C = 20 \text{ kg} / \text{m}^3 = (20 / 2,2) \text{ l} / \text{m}^3 = 9,09 \text{ l} / \text{m}^3$

Les constituants présents dans le mélange sont :
 $G + S + C + E + A + FS = 1000 \text{ l}$

Avec:

- $A = 50 \text{ l} / \text{m}^3$
- $C = 400 - 20 = 380 \text{ kg} / \text{m}^3$
- $E / (C + Fi) = 0,38$ $C = 380 \text{ kg} / \text{m}^3 = (380 / 3,1) \text{ l} / \text{m}^3 = 122,58 \text{ l} / \text{m}^3$
 On a donc $E = 152 \text{ l} / \text{m}^3$

On peut calculer les proportions des graviers et du sable :

$$G + S = 1000 - (122,58 + 152 + 50 + 9,09) = 666,33 \text{ l} / \text{m}^3$$

Avec $G/S = 1$

On a donc: $G = S = 333,16 \text{ l} / \text{m}^3$

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de 8/15 et 50% du 3/8 et pour les deux fractions du sable on prend 70% de 0/3 et 30% du 0/1.

Tableau VI.17 : Composition d'un BAP avec 5% de filler

Composant	Composant (Volume[l/m ³])	Densité absolue	Composant (Masse[kg/m ³])
Gravier 3/8	166,58	2,5	416,45
Gravier 8/15	166,58	2,6	433,10
Sable 0/3	233,21	2,54	592,35
Sable 0/1	99,94	2,5	249,85
Ciment	122,58	3,1	380
Eau	152	1	152
Filler	9,09	2,2	20
Superplastifiant 1,8%C	6,33	1,08	6,84

b - Dosage en fillers de 10% C :

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

Si on prend un dosage en filler de 10% C on a :

$$Fi = 10\% C = 40 \text{ kg} / \text{m}^3 = (40 / 2,2) \text{ l} / \text{m}^3 = 18,18 \text{ l} / \text{m}^3$$

Les constituants présents dans le mélange sont :

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

Avec:

- $A = 50 \text{ l/m}^3$
- $C = 400 - 40 = 360 \text{ kg/m}^3$
- $E/(C + Fi) = 0,38$, $C = 360 \text{ kg /m}^3 = (360/3,1) \text{ l/m}^3 = 116,12 \text{ l/m}^3$

$$\text{On a donc } E = 152 \text{ l/m}^3$$

On peut calculer les proportions de graviers et de sable :

$$G + S = 1000 - (116,12 + 152 + 50 + 18,18) = 663,7 \text{ l/m}^3$$

Avec $G/S = 1$

$$\text{On a donc : } G = S = 331,85 \text{ l/m}^3$$

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de 8/15 et 50% de 3/8 et pour les deux fractions du sable on prend 70% de 0/3 et 30% de 0/1.

Tableau VI.18 : composition d'un BAP avec 10% de filler

Composant	Composant (Volume[l/m ³])	Densité absolue	Composant (Masse[kg/m ³])
Gravier 3/8	165,92	2,5	414,8
Gravier 8/15	165,92	2,6	431,39
Sable0/3	232,29	2,54	590,01
Sable0/1	99,55	2,5	248,87
Ciment	116,12	3,1	360
Eau	152	1	152
Filler	18,18	2,2	40
Superplastifiant 1,8%C	6	1,08	6,48

c - Dosage en fillers à 15%C :

Le principe est le même que précédemment (§b), le dosage en fillers passe à 15% :

Si on prend un dosage en filler de 15% C on a :

$$Fi = 15\% C = 60 \text{ kg /m}^3 = (60 / 2,2) \text{ l/m}^3 = 27,27 \text{ l/m}^3$$

Les constituants présents dans le mélange sont :

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

Avec:

- $A = 50 \text{ l/m}^3$
- $C = 400 - 60 = 340 \text{ kg/m}^3$
- $E/(C+Fi) = 0,38$, $C = 340 \text{ kg / m}^3 = (340/3,1) \text{ l / m}^3 = 109,67 \text{ l / m}^3$
On a donc $E = 152 \text{ l / m}^3$

On peut calculer les proportions des graviers et du sable :

$$G + S = 1000 - (109,67 + 152 + 50 + 27,27) = 661,06 \text{ l/m}^3$$

Avec $G/S = 1$

$$\text{On a donc : } G = S = 330,53 \text{ l/m}^3$$

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de 8/15 et 50% du 3/8 et pour les deux fractions du sable on prend 70% de 0/3 et 30% du 0/1.

Tableau VI.19 : Composition d'un BAP avec 15% de filler

Composant	Composant (Volume[l/m ³])	Densité absolue	Composant (Masse[kg/m ³])
Gravier 3/8	165,26	2,5	413,15
Gravier 8/15	165,26	2,6	429,67
Sable 0/3	231,37	2,54	587,67
Sable 0/1	99,15	2,5	247,87
Ciment	109,67	3,1	340
Eau	152	1	152
Filler	27,27	2,2	60
Superplastifiant 1,8 %C	5,66	1,08	6,12

VI.2.3 Préparation de la gâchée :

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé. Dans notre cas elle est de $1/20^{\text{ème}}$ du m^3 .

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

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules cubiques ou prismatiques nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement dans l'étuve.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le superplastifiant est ajouté à première moitié de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, fumées de silice) et les introduire dans le malaxeur.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).
- Ajouter la deuxième moitié d'eau graduellement.
- Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration pour le béton autoplaçant et les vibrer à l'aide de la table vibrante pour le béton ordinaire.

VI.2.4 Conservation des éprouvettes :

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

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

CHAPITRE VII

Essais sur bétons : résultats et interprétations

Chapitre VII

Essais sur bétons : résultats et interprétations.

Introduction

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

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

- L'étalement au cône d'Abrams
- La stabilité au tamis
- La capacité de remplissage
- La résistance à la compression
- L'essai d'étalement modifié

VII.1 Essais sur béton frais :

VII.1.1 Essais au cône d'Abrams :

Cet essai est habituellement effectué pour le béton vibré dans le but de déterminer sa consistance par mesure de l'affaissement.

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

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



Figure VII.1. Étalement d'un BAP



Figure VII.2. Essai d'étalement

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

Tableau VII.1. Résultats d'essai de cône d'Abrams

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Étalement (cm)	62	69	74	70	59

Lorsqu'on augmente le dosage en superplastifiant de 1,4% (BAP1) à 1,8%(BAP2) on note une amélioration de la fluidité du béton de 62 à 69cm.

Le BAP3, dosé à 5% de filler, a une meilleure fluidité que celle du BAP dosé à 10% de Fi par contre le BAP5 dosé a 15% de filler a une faible fluidité par rapport au BAP3 et BAP4.

VII.1.2.Essai de la boîte en L :

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

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



Figure VII.3 : Boîte en L

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

Tableau VII.2. Résultats d'essai de la boîte en L

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Capacité de remplissage (H1/H2)	0,55	0,87	0,85	0,81	0,68

On remarque que la capacité de remplissage est supérieure à 0,8 pour tous les BAP sauf pour le BAP1 (dosage de 1,4% de superplastifiant) et le BAP5 (dosage de 15% de filler).

VII.1.3 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), mais l'essai le plus approprié pour la mesure de la stabilité est l'essai de stabilité au tamis (figureVII.4).

L'objectif de cet essai est d'évaluer les bétons autoplaçants vis-à-vis des risques de ségrégation et de ressuage en calculant le poids de la laitance passée au tamis par la formule donnée ci-après.



Figure VII.4. Essai de stabilité au tamis

$$P_{\text{laitance}}(\%) = \frac{\text{Poids de la laitance passée (kg)}}{4.8 \pm 0.2}$$

La calcul du pourcentage de laitance par rapport au poids de l'échantillon conduit à classer le béton autoplaçant de la façon suivante :

- $0\% \leq P_{\text{laitance}} (\%) \leq 15\%$ Stabilité satisfaisante.
- $15\% \leq P_{\text{laitance}} (\%) \leq 30\%$ Stabilité critique.
- $P_{\text{laitance}} (\%) > 30\%$ Stabilité très mauvaise (béton inutilisable).

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

Tableau VII.3. Résultats de l'essai de la stabilité

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Poids de laitance %	6,5	10	4	3	2

On remarque que les deux premiers BAP ont une stabilité moyenne (5 à 10%). Alors que les trois derniers, contenant les fillers, se caractérisent par une grande stabilité (< 5%).

VII.1.4 Essai d'étalement modifié

Cet essai a le même principe que l'essai au cône, sauf que le béton s'écoule au travers de barres d'armatures. Le but est d'évaluer sa tendance au phénomène de blocage et voir si notre béton répond pleinement aux exigences recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation.



Figure VII.5. Essai d'étalement modifié

On constate que pour tous les BAP il n'y a pas de ségrégation. Les BAP s'écoulent de manière uniforme au travers de l'anneau et la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

VII.2 Essais sur béton durci :

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

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

On note la charge maximale atteinte P (MN) et la surface de chargement S (m²), la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

$$\sigma_c [\text{MPa}] = P / S$$

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

$$\sigma_c [\text{MPa}] = P / a^2$$

P : charge de rupture

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

σ_c : résistance à la compression



Figure VII.6. Essai de compression.

a) éprouvette avant écrasement.

b) éprouvette après écrasement

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

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

Tableau VII.4. Résistance à la compression des bétons étudiés

Béton	Résistance à la compression (Mpa)		
	3 jours	7 jours	28 jours
BAP1	26,2	33,29	50,1
BAP2	29,69	41,02	53,4
BAP3	34,33	49,52	60,1
BAP4	21,81	32,43	47,4
BAP5	21,34	29,28	44,2

VII.2.2 Récapitulatif des résultats :

Le tableau VII.5 est un récapitulatif des performances des différents types de bétons à l'état frais et durci.

Béton	Etalement (cm)	Boite en L (H1/H2)	Stabilité au tamis (%)	Résistance à la compression (MPa)		
				3 jours	7 jours	28 jours
BAP1	62	0,55	6,5	26,2	33,29	50,1
BAP2	69	0,87	10	29,69	41,02	53,4
BAP3	74	0,85	4	34,33	49,52	60,1
BAP4	70	0,81	3	21,81	32,43	47,4
BAP5	59	0,68	2	21,34	29,28	44,2

VII.2.3 Observations visuelles :

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

- le phénomène de ségrégation lors de l'étalement au cône d'Abrams.
- le phénomène de blocage pour l'essai de la boite en L.
- la maniabilité du béton lors du malaxage.
- le ressuage et la stabilité lors du remplissage des moules.

VII.3 Discussion et interprétation des résultats :

VII.3.1 Rhéologie :

VII.3.1.1 Effet du superplastifiant :

D'après les essais d'étalements effectués au cône d'Abrams, on constate que pour le BAP1 (1,4%SP) la valeur de l'étalement est de 62cm. Cette valeur est inférieure aux spécifications (65cm) et ne suffit pas pour considérer le béton en tant que béton autoplaçant. Ceci est expliqué par l'insuffisance du dosage en SP qui ne permet pas de défloculer tous les grains de ciment, la quantité d'eau libérée est donc insuffisante pour l'obtention de la fluidité désirée. Par contre pour le BAP2, dosé à 1,8% de SP, l'étalement atteint 69cm. L'augmentation du dosage en SP a permis une plus grande défloculation des grains de ciment, la quantité d'eau libérée dans le béton est donc plus importante.

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

Les valeurs obtenues par l'essai de la boîte en L, confirment les résultats des deux essais précédents. La capacité de remplissage (H1/H2) d'un BAP doit être supérieure à 0,80. Dans notre cas, elle est de 0,87 pour le BAP2 et de seulement 0,55 pour le BAP1. Lors de la réalisation de l'essai on remarque que le BAP2 présente de meilleures performances vis-à-vis du phénomène de blocage au niveau des armatures.

VII.3.1.2 Effet de l'ajout minéral (Fillers):

Les BAP3, BAP4 et BAP5 contenant tous les trois des fines ont eu des comportements différents. Le BAP3 dosé à 5% de fillers, présente une fluidité élevée (74cm), alors que pour les BAP4 et BAP5, on note une diminution de la fluidité (68cm).

On peut expliquer ce phénomène par le fait que les fillers incorporés à petit dosage augmentent le volume de pâte dans le béton. De ce fait, ils améliorent 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/L et un dosage constant en SP, il y a perte de la fluidité.

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

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

La croissance considérable du volume de pâte par ajout de fillers améliore largement la stabilité : on note une stabilité de 2% pour le BAP5, contre une stabilité de 3% pour le BAP4 et de 4% pour le BAP3, et 9% pour un BAP ne contenant pas de filler.

Le BAP3 dosé à 5% de filler se caractérise par une bonne stabilité et une bonne fluidité, mais aussi par une bonne capacité de remplissage qui est assurée par l'action combinée du superplastifiant et des fillers.

Contrairement au BAP5 qui, par surdosage en fines a perdu sa fluidité, sa grande stabilité le rendant plus visqueux et limitant sa capacité de remplissage (performances en milieu confiné). Ces résultats ont été constatés par l'essai de la boîte en L.

VII.3.2 Propriétés mécaniques :

Pour l'interprétation des résultats des essais mécaniques on s'est basé sur les performances mécaniques à la compression.

VII.3.2.1 Effet du superplastifiant :

Les essais d'écrasement effectués ont montré que le BAP1 (dosé à 1,8% de SP) a une meilleure résistance que le BAP2 (dosé à 1,4% de SP) (figureVII.7) du fait que la présence de ce type d'adjuvant diminue la quantité d'eau de gâchage et la porosité, et donc augmente la compacité du béton.

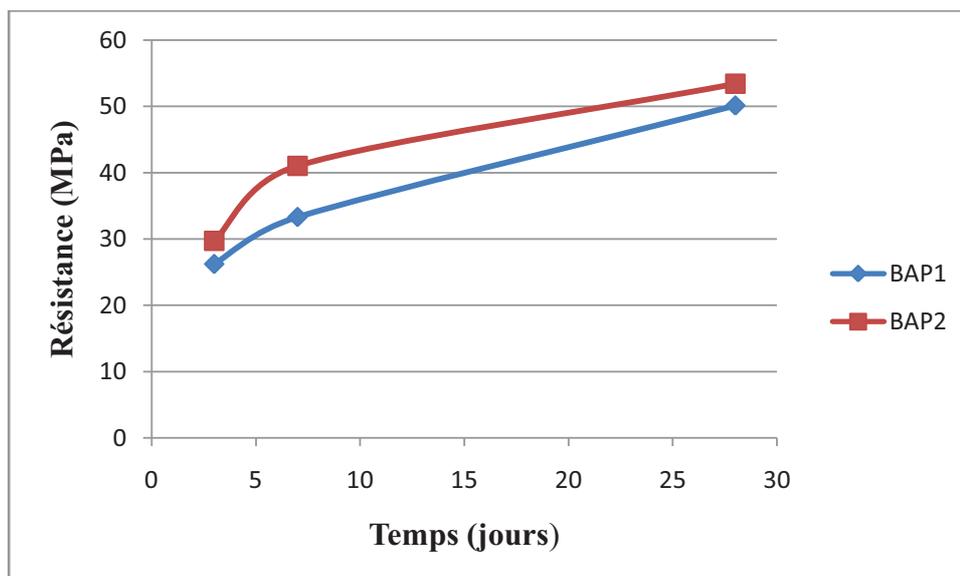


Figure VII.7 Résistances à la compression de deux BAP à différents dosages en SP

VII .3.2.2 Effet des fillers :

Les fillers étant une poudre extra fine, en l'ajoutant au béton, elle joue le rôle d'un correcteur granulométrique, elle comble les vides existant dans le matériau, augmente la compacité, et diminue la porosité totale donc on remarque que le BAP3 contenant un faible pourcentage de fillers (5%) a amélioré la résistance mécanique à 28 jours de 14,41% par rapport au béton sans fillers

Par contre en augmentant la quantité des fillers (10 et 15%) pour les BAP4 et BAP5 on remarque une chute de résistance de 21,13 et 26,45% respectivement par rapport au BAP 3 (dosé à 5%) .

Cette diminution s'explique par la substitution de la quantité du ciment par une quantité égale des fillers. Pour les BAP4 et BAP5 on a dépassé la quantité optimale qu'on doit ajouter alors la quantité de ciment n'est pas suffisante pour réagir avec toute la quantité de fillers.

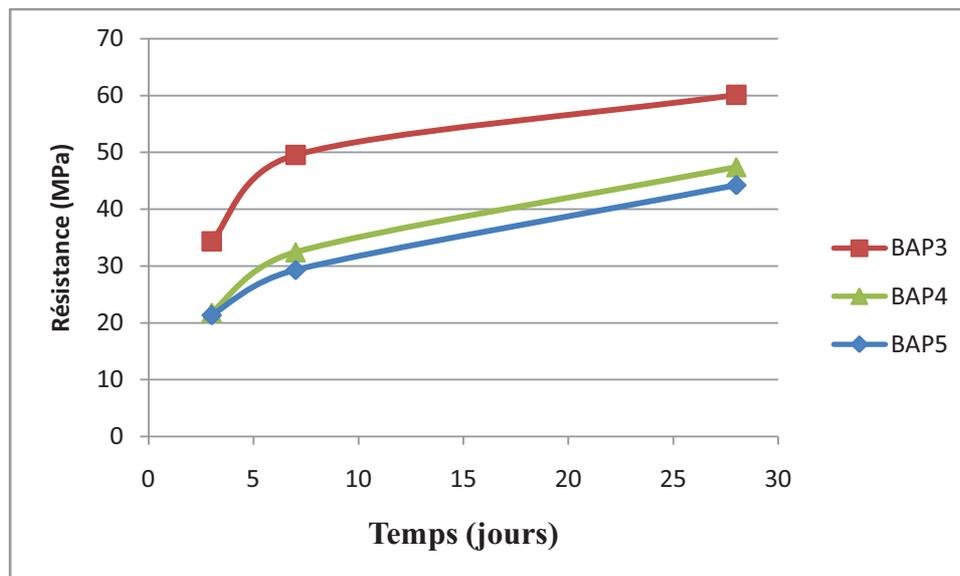


Figure VII.8. Influence de la présence et du dosage des fillers sur la résistance à la compression

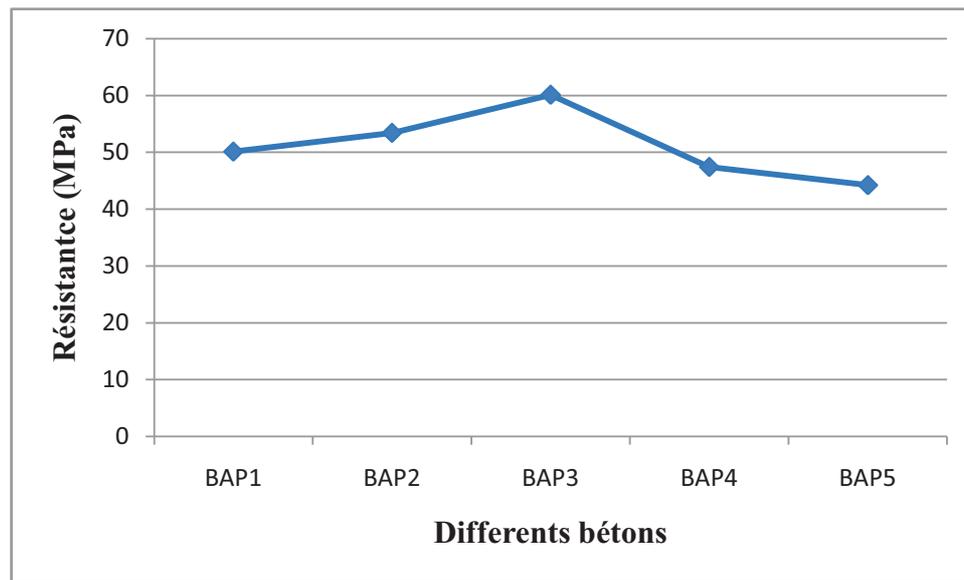


Figure VII.9 : Résistance à la compression à 28 jours des différents bétons

VII.4. Conclusion :

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

Dans cette étude on a vu l'effet :

- Du dosage en superplastifiant.
- De la présence des fillers.
- Du dosage en fillers.

Cette étude nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- ◆ Il est possible de confectionner un béton à la fois : fluide, stable, homogène et résistant c'est le béton autoplaçant (BAP).
- ◆ Les BAP présentent de meilleures performances que celles des bétons ordinaires, ils se caractérisent par :
 - Une grande fluidité qui permet une mise en place facile
 - Une bonne stabilité : résistance à la ségrégation et au ressuage
 - Une parfaite homogénéité
 - De meilleures résistances mécaniques (faible porosité)

- ◆ L'ajout du superplastifiant permet d'améliorer la fluidité des BAP en diminuant le rapport E/C, ce qui limite la porosité du béton et améliore sa résistance mécanique.
- ◆ L'incorporation du fillers dans la composition d'un BAP améliore la fluidité et la stabilité (évite le ressuage et la ségrégation), son action varie selon son dosage faible ou élevé. Le dosage élevé en fillers nécessite l'utilisation d'un superplastifiant pour maintenir la fluidité et l'ouvrabilité.

Agissant comme un correcteur granulométrique, les fillers diminuent la porosité du béton et augmentent donc sa résistance.

Et du point économique on peut conclure qu'on a pu économiser une quantité de ciment et la remplacer avec des fillers qui coûtent quatre fois moins cher que le ciment en garantissant toujours la résistance de notre béton

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE :

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

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

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

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

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

Certains de ces thèmes sont étudiés dans le Projet National sur les bétons autoplaçants.

Les objectifs du projet national sont de mener des recherches finalisées sur :

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

Ce travail nous a néanmoins permis de nous familiariser avec le travail expérimental, de constater l'importance du rôle des adjuvants et de leur dosage qui doit être soigneusement étudié, ainsi que la possibilité de développer l'utilisation efficace des fillers et de tous les sous-produits de la filière de production des granulats.

L'utilisation des BAP devrait se généraliser dans les années à venir dans notre pays, car ils suscitent beaucoup d'intérêt, particulièrement chez les producteurs de béton prêt à l'emploi, et ce en raison de la qualité esthétique et de la facilité de bétonnage qu'ils permettent d'obtenir

Références Bibliographique

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] K.H.KHAYAT, « *Colloques sur les bétons autonivelants* » Centre de Recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université LAVAL Québec 1^{er} Novembre 1996 ;
- [2] OKAMURA. H. , OZAWA , K. (1994), “*Self compactable high performance concrete in Japan*” *ACI International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok, Thailand,*
- [3] HAYAKAWA , M., MATSUOKA,Y., YOKOTA, K. (1995).”*Application of super workable concrete in the construction of 70_story building in Japan*” *ACI SP 154,*
- [4] IZUMI, I., YONEZAWA, T, IKEDA, Y., MUTA, A. (1995) “*Placing 10 000 m3 super workable concrete for guide track structure of retractable roof of Fukuoka Dome, Supplementary*” *Papers, 2nd CANMET \ ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas,*
- [5] GILLES Escadrilles, Responsable pédagogique, CARMEUSE France,
« *Formation continue actualisante* » – 17 et 18 Octobre 2001 ;
- [6] P. Claude AITCIN, « *Liant hydraulique, GCI 710* » Université de SHERBROOKE
Canada ;
- [7] J.BARON et J-P.OLLIVIER , *Les béton :bases et données pour leur formulation,Eyrolles,1999 ;*
- [8] *Projet national de recherche CERIB, « béton autoplaçant BAP », France,*
Octobre 2001 ;

- [9] OZAWA, K, MAEKAWA, K., OKAMURA, H. (1992, “Development of high performance concrete” *Journal of the Faculty of Engineering*, vol XLI, n°3, University of Tokyo,
- [10] K.H.KHAYAT, « *Colloques sur les bétons autonivelants* » centre de recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université LAVAL Québec 1er Novembre 1996 ;
- [11] MANAI, K (1995), « *Étude de l’effet d’ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants* » *Mémoire de Maîtrise, Université de Sherbrooke* ;
- [12] Z. ABIB , *Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants, thèse de magister USTHB, 2004*
- [13] Kedjour NASR-EDDINE « *propriétés et pathologie du béton* » *Office des publications universitaires – Alger* ;
- [14] CEBTP, « *Bétons autoplaçants, rapport 98 004/98 006* » 1995, EYROLLES ;
- [15] M.MOURET et F.KHARCHI, *Effet de la taille des granulats sur le comportement rhéologique des bétons (Application aux BAP), Algérie équipement, mai 2005.*
- [16] P.ROUGEAU et CH MARRY DIPPE, O.FRANCY, *Les BAP : synthèse des connaissances et campagne expérimentale, CERIB, février 2001.*
- [17] YURUGI, M., SAKATA, M., IWAI, M., SAKAI, G. (1989) “*Mix proportion for highly workable concrete*” ;
- [18] *Dossier technique « Les bétons autoplaçants », Christophe CHUCHE, MBT France ;*
- [19] N. REBOUH, *Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants, projet de fin d’étude ENP, 2006.*
- [20] N.KEDJOUR, *Le laboratoire du béton, OPU, mars 2003*

[21] Société BERA TEST, *Catalogue laboratoire : instruments de contrôle pour Génie Civil, Suisse, 2005.*

ANNEXES

ANNEXE I

Mode opératoire des essais de ciment

1 - Essai de consistance et de prise

Objet de l'essai

Calculer la quantité d'eau optimale et le temps de prise

Mode opératoire

a) Essai de consistance

- Monter la sonde de consistance sur l'appareil de Vicat et ajuster le repère de la tige coulissante sur le zéro de la règle graduée en abaissant la sonde jusqu'à la plaque de base
- Peser 500g de ciment
- Peser une première quantité d'eau
- Verser la quantité d'eau dans le récipient du malaxeur, ajouter soigneusement les 500g de ciment et régler le zéro du chronomètre.
- Mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 secondes, arrêter le malaxage, démonter le récipient, racler les parois à l'aide d'une spatule, remettre la pâte raclée dans la gâchée et remonter le récipient.
- Malaxer de nouveau pendant 90 secondes, puis arrêter la machine.
- Remplir immédiatement le moule tronconique placé sur la plaque support et légèrement graissé au préalable jusqu'au refus. Araser ensuite la surface du moule avec précaution de manière à obtenir une surface supérieure lisse
- Mettre le moule et la plaque de base dans l'axe de la sonde dans l'appareil de Vicat, rabaisser la sonde jusqu'au contact avec la surface supérieure de la pâte et observer un temps d'arrêt. Lâcher ensuite la partie mobile de l'appareil de Vicat.
- Noter la distance de la sonde du fond du moule à la fin de la pénétration, indiqué par le repère de la tige sur la règle graduée de l'appareil.
- Si cette distance n'est pas comprise entre 5 et 7 mm, refaire l'essai avec une autre pâte en variant la quantité d'eau en plus ou en moins de quelques grammes, jusqu'à avoir une distance de 5 à 7 mm.
- Noter la quantité d'eau correspondant à la distance comprise entre 5 et 7 mm.

b) Essai de prise

- Monter l'aiguille sur l'appareil de Vicat et ajuster le repère de la tige coulissante sur le zéro de la règle graduée en abaissant la sonde jusqu'à la plaque de base.
- Peser 500 g de ciment et la quantité d'eau normalisée.
- Verser la quantité d'eau dans le récipient du malaxeur, ajouter soigneusement les 500 g de ciment et régler le zéro du chronomètre. Noter l'heure de gâchage aussi.

- Mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 secondes, arrêter le malaxage, démonter le récipient, racler les parois à l'aide d'une spatule, remettre la pâte raclée dans la gâchée et remonter le récipient.
- Malaxer de nouveau pendant 90 secondes, puis arrêter la machine.
- Remplir immédiatement le moule tronconique placé sur la plaque support et légèrement graissé au préalable jusqu'au refus. Agrafer ensuite la surface du moule avec précaution de manière à obtenir une surface supérieure lisse
- Mettre le moule et la plaque de base dans l'axe de l'aiguille de l'appareil de Vicat, rabaisser l'aiguille jusqu'au contact avec la surface supérieure de la pâte et observer un temps d'arrêt. Lâcher ensuite la partie mobile de l'appareil de Vicat.
- Noter la distance de l'aiguille du fond du moule à la fin de la pénétration et noter en même temps l'heure de lecture dans la case correspondante. Placer ensuite le moule avec la plaque de base dans le bain d'eau et nettoyer l'aiguille de pénétration
- Si cette distance n'est pas comprise entre 3 et 5 mm, refaire l'opération de pénétration à intervalles réguliers de 10 à 15 mn et à des endroits distants de 10 mn du bord du moule. Noter à chaque fois la distance de l'aiguille à la base du moule et l'heure de lecture dans la case correspondante.
- Noter l'heure de début de prise correspondant à la distance comprise entre 3 à 5 mm.
- Retourner le moule sur sa petite base et commencer à noter l'enfoncement de l'aiguille à des intervalles variant de 300 mn en les diminuant à 15 mn vers la fin de prise. Noter à chaque fois l'enfoncement de l'aiguille et l'heure dans la case correspondante.
- Noter l'heure de fin de prise correspondant à un enfoncement de 0.5 mm.

2 -Essai de détermination des résistances mécaniques.

- Préparer les constituants du mortier
 - *Ciment : 450 g
 - *Sable normalisé : 1350 g
 - *Eau : 225 g
- Introduire l'eau dans la cuve du malaxeur
- Verser le ciment dans la cuve du malaxeur
- Mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 30''
- Introduire le sable régulièrement pendant 30''
- Mettre le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30''
- Arrêter le malaxeur pendant 90''
 - pendant les premières 15'' enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant au milieu de celui-ci.
- Reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 60''
- Moulage des éprouvettes dans des éprouvettes prismatiques de dimensions 16×4×4 cm en deux couches :
 - Couche 01 avec serrage par 60 chocs sur la table à chocs
 - Couche 02 avec serrage par 60 chocs sur la table à chocs
- Arasement des éprouvettes à l'aide d'une règle métallique plate.
- Procéder au marquage des éprouvettes.
- Poser une plaque de verre (ou en acier ou tout autre matériau imperméable) de 210×185×6 mm sur le moule.
- Démoulage des éprouvettes :
 - 20 mn avant l'essai à 24 heures

- Entre 20 et 24 heures après moulage pour les autres échéances.
- Mettre les éprouvettes dans l'eau à 20 °C
- Retirer les éprouvettes de l'eau au maximum 15 minutes avant l'essai.
- Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec face de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci.
- Procéder à l'essai de flexion sur le prisme en appliquant la charge à raison de 50 N/S.
- Transcrire les valeurs observées des charges de rupture
- Placer le demi-prisme obtenu en flexion dans le dispositif de compression en le centrant par rapport aux plateaux de la machine.
- Procéder à l'essai de compression en appliquant la charge à raison de 2400N/S
- Transcrire les valeurs observées des charges de rupture.

ANNEXE II

Mode opératoire des essais concernant les bétons autoplaçants à l'état frais.

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

Objet de l'essai :

Caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné.

Matériel nécessaire :

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

Mode opératoire :

- Mettre le plateau sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque.
- Placer le cône au centre du plateau.
- Prélever un échantillon représentatif du béton.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir.
- Remplir le cône en déversant le béton de manière continue jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire avec une truelle et nettoyer la plaque avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois le béton étalé, mesurer (au centimètre le plus proche) le diamètre final sur deux cotés perpendiculaires.
- Si les deux valeurs sont différentes de plus de 5cm, l'essai est invalide et reconduit.
- Exprimer le résultat final en terme de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.

2 - Essai de stabilité au tamis

Objet de l'essai :

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

Matériel nécessaire :

- Seau de 10 litres + couvercle
- Tamis 5mm diamètre 315mm + fond de tamis

- Balance : précision minimale 20g, portée minimale 20kg.

Mode opératoire :

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

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

3 - Essai de la boîte en L (Capacité de remplissage)

Objet de l'essai

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

Matériel nécessaire

Boîte en L

Mode opératoire

- Vérifier que la boîte est sur un plan horizontal.
- Remplir de béton la partie verticale de la boîte en L (Son volume est d'environ 13 litres)
- Araser et laisser le béton reposer pendant 1 minute.
- Enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm.
- Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 . On exprime le rapport H_2/H_1 .

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