

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURE

Présenté par : SAIDIA Madjida

Thème : Contribution à la formulation d'un béton auto-plaçant à base de matériaux locaux

Sous la direction de : Pr. Benmarce Abdelaziz

Juin 2016

سنة الفجر النبوي

Remerciement

Tout d'abord, je tiens à remercier en premier lieu, mon dieu le tout puissant qui m'a donné la patience pour effectuer ce travail.

Je remercie mes très chers parents, pour leurs aides et leurs patiences.

Je remercie l'encadreur de mémoire **Pr : BENMARES ABD EL AZIZ** pour son suivi et ses conseils, je remercie aussi le chef département de Génie Civil **Dr : BELABED Lazhar**, et **Mme DORBANI**, ainsi que tous les enseignants et personnel administratif du département de GC et toutes les personnes de la bibliothèque d'université de 08 Mai 45 –Guelma-.

Je remercie aussi toutes les personnes de laboratoire de l'EST -BELKHEIR- et un grand respect à **Mr. SAADAOUI RIDHA**, pour leurs aides et forte contribution à la bonne direction durant la période de mon stage, et à tous les étudiants de la promotion de 2016, ainsi que tous les autres camarades du département de Génie Civil.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents, ma mère 'RNIA' qui m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père 'KAMEL', qui m'ont aidé durant mes années d'étude et qui ont été toujours là pour moi.

A mes sœurs :

Safa, Ikhlas, Chams, et la plus belle Romaissa

A mes amies:

Iman R, Soad H, Noor El-houda, Ayesha M, Khawla,
Amina B, Zahra

المخلص

ان العمل المقدم في هذه المذكرة يتمحور حول مساهمة تصميم الخرسانة ذاتية التوضع المتكونة من مواد مصنعة محلية الخرسانة ذاتية التوضع هي خرسانة قادرة على السيولة وتعمير كل أنحاء القالب الذي توضع فيه مهما يكن شكل هذا القالب، ويكون هذا التعمير تحت تاثير الوزن الذاتي فقط فلا تحتاج لأي نوع من عمليات الرص.

المحور الأول: يتمحور حول دراسة عامة للخرسانة ذاتية التوضع وكذا الخصائص المرجوة منها، في المحور الثاني يتناول مختلف طرق تصميم الخرسانة ذاتية التوضع، وفي المحور الاخير يتناول مختلف التجارب التي تقام على هذه الخرسانة في الحالة الطرية والصلبة. و في الاخير خاتمة مع افاق مستقبلية لأعمال مستقبلية

الكلمات الدالة: الخرسانة ذاتية التوضع، التصميم، سيولة، الخصائص الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية

Abstract

The research presented in this thesis is articulated around contribution of design of Self-Compacting Concrete (SCC), made with produced locally components. Self-compacting concrete can fill all corners of formwork, whatever it shape, and only under self-weight, without any vibration. The first chapter is about general study of self-compacting concrete and his properties the second chapter treated different ways of designing self-compacting concrete, and the third chapter is about different tests on SCC fresh and solid state. Finally, a general conclusion was drawn with some perspectives for future works.

Keys words: Self-compacting concrete, design, mechanical properties, and physical properties.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire s'articule autour de la contribution de la formulation d'un BAP à base de matériaux locaux. Le béton auto-plaçant est un type de béton, qui se mettent en place, sous son propre poids, il ne nécessite aucune vibration.

Le premier chapitre, présente une étude générale sur le BAP, et ses propriétés, le deuxième chapitre, parle de différentes méthodes de formulation de BAP, le troisième chapitre, présente des différents essais sur le BAP, frais et durci. Finalement une conclusion a été tirée avec des perspectives pour d'autres travaux.

Mots clés: béton auto-plaçant, formulation, propriétés mécaniques, propriétés physiques

Sommaire

ملخص

ABSTRACT

Résumé

Liste des notifications

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....-1-

Chapitre I : Etude bibliographique sur BAP

I-1 Introduction.....-3-

I-2 Définition.....-3-

I-3 Constituants d'un BAP.....-5-

I-3-1 Le ciment.....-5-

I-3-2 Les granulats.....-7-

I-3-3 L'eau.....-8-

I-3-4 Les adjuvants.....-9-

a- Les super-plastifiants.....-10-

b- L'agent colloïdal.....-12-

c- Ajouts minéraux.....-13-

❖ Fumée de silice.....-14-

❖ Cendres volantes.....-17-

❖ Laitier de haut fourneau.....-18-

❖ Fillers calcaires.....-19-

d- Autres additions.....-21-

I-4 Propriétés recherchées dans un BAP à l'état frais.....-21-

I-4-1 Déformabilité.....-21-

a-Déformabilité libre.....-22-

b-Déformabilité restreinte.....-22-

| | |
|---|------|
| I-4-2 Stabilité..... | -22- |
| a-Stabilité dynamique..... | -23- |
| ❖ Ségrégation statique..... | -23- |
| ❖ Ségrégation dynamique..... | -23- |
| b-Stabilité statique..... | -24- |
| ❖ Tassement..... | -24- |
| ❖ Le ressuage..... | -24- |
| I-4-3 Pompabilité..... | -25- |
| I-4-4 Caractéristiques rhéologiques fondamentales de BAP..... | -25- |
| a- Contrainte de cisaillement..... | -26- |
| b- Vitesse de cisaillement..... | -26- |
| c- Seuil de cisaillement..... | -26- |
| d- Viscosité..... | -26- |
| I-5 Propriétés recherchées dans un BAP à l'état durci..... | -27- |
| I-5-1 Propriétés mécaniques..... | -27- |
| a- Résistance mécanique..... | -27- |
| b- Module d'élasticité..... | -28- |
| c- Retrait..... | -29- |
| d- Résistance à la traction..... | -29- |
| I-5-2 Propriétés physico-chimiques..... | -29- |
| I-6 Mise en œuvre et précautions d'emploi..... | -30- |
| I-6-1- Mise en œuvre..... | -30- |
| I-6-2-Précautions d'emploi..... | -30- |
| I-7 Fabrication de béton auto-plaçant..... | -31- |
| I-8 Contrôle du BAP..... | -31- |
| I-9 Domaine d'application..... | -32- |
| I-10 Avantages de BAP..... | -32- |
| I-11 Inconvénients de BAP..... | -33- |

| | |
|----------------------|------|
| I-12 Conclusion..... | -34- |
|----------------------|------|

Chapitre II : Formulation du BAP

| | |
|--|------|
| II-1 Définition de la formulation..... | -35- |
| II-2 Objectif de la formulation..... | -35- |
| II-3 Principe de formulation de BAP..... | -36- |
| II-3-1 Les facteurs influençant sur la formulation..... | -36- |
| II-3-2 Les critères de formulation..... | -36- |
| II-4 Contrainte de formulation..... | -36- |
| II-5 Qualification de formulation..... | -37- |
| II-6 Particularité de la formulation..... | -38- |
| II-6-1-Un volume de pâte élevé..... | -38- |
| II-6-2-Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante..... | -38- |
| II-6-3-L'emploi de super-plastifiant..... | -39- |
| II-6-4-L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité..... | -39- |
| II-6-5-Un faible volume de gravillon..... | -41- |
| II-7 Pratique actuelle de la formulation..... | -42- |
| II-8 Influence de la particularité de formulation sur les propriétés de BAP..... | -43- |
| II-8-1 A l'état frais..... | -43- |
| a- Quantité des fines..... | -43- |
| ❖ Fumée de silice..... | -43- |
| ❖ Cendres volantes..... | -44- |
| ❖ Laitier de haut fourneau..... | -44- |
| ❖ Filler calcaire..... | -44- |
| II-8-2 L'état durci..... | -45- |
| a- Fumée de silice..... | -45- |
| b- Cendres volantes..... | -45- |
| c- Laitier de haut fourneau..... | -46- |
| d- Filler calcaire..... | -46- |

| | | |
|---------|--|------|
| II-9 | Les approches de formulation de BAP..... | -46- |
| II-9-1 | L'approche basée sur l'optimisation du mortier..... | -47- |
| II-9-2 | L'approche basée sur l'optimisation de pâte..... | -47- |
| II-9-3 | L'approche basée du squelette granulaire..... | -48- |
| II-9-4 | L'approche basée sur un plan d'expérience..... | -49- |
| II-9-5 | L'approche basée sur l'utilisation du Mortier du Béton Equivalent..... | -49- |
| II-10 | Les méthodes de formulation de BAP..... | -50- |
| II-10-1 | La méthode Japonaise..... | -50- |
| | a-Dosage des gravillons..... | -50- |
| | b-Dosage du sable..... | -51- |
| | c-Dosage du liant..... | -51- |
| | d-Dosage de l'eau et du super-plastifiant..... | -51- |
| II-10-2 | La méthode française..... | -52- |
| II-10-3 | La méthode suédoise..... | -53- |
| II-11 | Exemples de formulation de BAP..... | -54- |
| II-12 | Conclusion..... | -58- |

Chapitre III : Caractérisation du BAP

| | | |
|---------|--|------|
| III-1 | Introduction..... | -59- |
| III-2 | Caractérisation de BAP à l'état frais..... | -59- |
| III-2-1 | Mobilité en milieu non confiné..... | -59- |
| | a- Essai d'étalement..... | -59- |
| III-2-2 | Mobilité en milieu confiné..... | -61- |
| | a- Essai de la boîte en L..... | -62- |
| | b-Essai d'anneau Japonaise..... | -64- |
| | c- Essai de tube en U..... | -65- |
| | d-Essai de l'entonnoir en forme de V..... | -65- |
| III-2-3 | Stabilité..... | -66- |

| | |
|---|------|
| a- Essai de stabilité au tamis..... | -66- |
| b- Essai de capacité au ressuage..... | -67- |
| III-3 Caractérisation de BAP à l'état durci..... | -69- |
| III-3-1 Essai de résistance en compression..... | -69- |
| III-3-2 Essai de traction par flexion..... | -70- |
| III-3-3 Essai de compression sur demi-prismes..... | -72- |
| III-4 Exemple de formulation et résultats d'essais..... | -72- |
| III-5 Conclusion..... | -75- |
| Conclusion générale et perspectives..... | -76- |

Liste des notifications et abréviations

| | |
|--------------------------|---|
| AFGC : | Association Française de Génie Civil. |
| AV : | Agent de viscosité. |
| BAP : | Béton Auto-Plaçant. |
| BO : | Béton Ordinaire. |
| C : | Dosage en ciment. |
| Cm : | Centimètre (unité de mesure). |
| D_{max} : | Diamètre maximal des granulats. |
| D_{moy} : | Diamètre moyen des granulats. |
| EA : | Entraîneur d'Air. |
| E : | Dosage en eau. |
| E/C : | Rapport Eau/Ciment. |
| E/L : | Rapport Eau/Liant. |
| G : | Dosage en Gravier. |
| G/S : | Rapport Gravier/Sable. |
| H₁ : | La partie verticale de la boîte en L. |
| H₂ : | La partie horizontale de la boîte en L. |
| K_g : | Kilogramme. |
| M_m : | Millimètre. |
| N : | Newton. |
| NA : | Norme Algérienne. |
| Pa : | Pascal. |
| S : | Dosage en Sable. |
| SP : | Super-Plastifiant. |
| R_c : | Résistance mécanique. |
| µm : | Micromètre. |
| Ø : | Diamètre des barres. |

Liste des figures

Chapitre I : Etude bibliographique sur BAP

| | |
|---|------|
| Figure I-1 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle..... | -4- |
| Figure I-2 : triangle des compositions principales de ciment | -6- |
| Figure I-3 : Choix de la granularité pour un BAP..... | -8- |
| Figure I-4 : Répulsion électrostatique entre les particules des ciments | -10- |
| Figure I-5 : Flocculation des grains de ciments | -11- |
| Figure I-6 : Les utilisations des super-plastifiants..... | -11- |
| Photo I-1 : Fumée de silice au MEB | -17- |
| Photo I-2 : Microstructure des particules des cendres volantes | -18- |
| Photo I-3 : Granulation du laitier de haut fourneau d'El-Hadjar..... | -19- |
| Figure I-7 : Illustration de l'effet filler | -20- |
| Figure I-8 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BO | -28- |
| Figure I-9 : Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et BO Avec leurs valeurs expérimentales..... | -28- |

Chapitre II : Formulation du BAP

| | |
|--|------|
| Figure II-1 : Volume de pate relatif au BAP est différent de BV | -38- |
| Figure II-2 : Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique D'un béton..... | -39- |
| Figure II-3 : Interaction entre l'eau et les polyccharides..... | -40- |
| Figure II-4 : Optimisation du dosage agent de viscosité super-plastifiant | -40- |
| Figure II-5 : Notion d'excès de pate | -47- |
| Figure II-6 : Réduction du volume de gravillon a la moitié de sa compacité. - | -51- |
| Figure II-7 : Recherche du dosage en eau et en super-plastifiant | -52- |

Chapitre III : Caractérisation du BAP

| | |
|---|------|
| Figure III-1 : Mesure d'étalement | -60- |
| Photo III-1 : Essai d'étalement | -61- |
| Figure III-2 : Essai d'étalement de BO et BAP | -61- |
| Figure III-3 : Risque de blocage au droit des armatures | -62- |
| Figure III-4 : Schéma de la boîte en L | -63- |
| Photo III-2 : La boîte en L | -63- |
| Figure III-5 : Schéma d'essai d'anneau Japonaise | -64- |
| Photo III-3 : Essai d'anneau Japonaise | -64- |
| Figure III-6 : Schéma de tube en U | -65- |
| Figure III-7 : Schéma de l'essai de V –Funnel-..... | -66- |
| Photo III-4 : Essai de stabilité de tamis | -67- |
| Figure III-8 : schéma de l'essai de stabilité au tamis | -67- |
| Figure III-9 : Essai de ressuage a l'aéromètre | -68- |
| Photo III-5: Aéromètre a béton | -69- |
| Photo III-6 : Essai de compression Laboratoire NHC de l'est Belkheir -Guelma-..... | -70- |
| Photo III-7 : Mesure de la résistance a la traction par flexion | -71- |
| Figure III-10 : Disposition de la poutre dans l'appareille d'essai de flexion 3et 4 Points | -71- |
| Photo III-8 : Mesure de la résistance a la compression sur demi- prisme..... | -72- |

Liste des tableaux

| | |
|---|------|
| Tableau I-1 : Analyse chimique de ciment..... | -6- |
| Tableau I-2 : Les paramètres rhéologique des pâtes de différents dosages en SP | -12- |
| Tableau I-3 : Les paramètres rhéologique des pâtes de différents dosages en AV | -13- |
| Tableau I-4 : Echantillon de diverse composition de fumées de silice dans le mortier..... | -15- |
| Tableau I-5 : Critères sur les propriétés du fillers physique | -20- |
| Tableau I-6 : Critères sur les propriétés du fillers chimiques..... | -21- |
| Tableau II-1 : Exemple de formulation de BAP(1)..... | -54- |
| Tableau II-2 : Exemple de formulation de BAP(2)..... | -55- |
| Tableau II-3 : différente BAP avec des différentes formules..... | -56- |
| Tableau II-4 : Exemple de formulation Japonaise | -57- |
| Tableau II-5 : Exemple de formulation Canadienne | -57- |
| Tableau III-1 : Caractéristique des matériaux utilisent..... | -72- |
| Tableau III-2 : Composition des différents bétons | -73- |
| Tableau III-3 : Caractéristique des bétons d'étude (BAP) et (BO)..... | -73- |

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Le sujet de ce mémoire s'articule autour de la contribution à la formulation d'un béton auto-plaçant à base de matériaux locaux.

Le béton auto-plaçant est un béton très fluide, capable de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant des moyens de vibration interne ou externe, sous l'effet de gravité. Ce type de béton doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées avec, cependant une vitesse dépendante de la viscosité du mélange.

L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 80 par les chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été reprise rapidement par les grands groupes industriels Japonais pour des projets d'envergure. Ces bétons connaissent un essor important, car ils présentent deux intérêts technico-économiques majeurs :

- ✚ Une diminution du temps de personnel lors de la mise en place du béton en chantier. Cela est d'autant plus important qu'elle devient de plus en plus coûteuse et génératrice de délais étant donné la complexité sans cesse croissante des coffrages (forme, ferrailage,...)
- ✚ L'obtention d'une meilleure qualité du béton in-situ. Pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation. Cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

En Algérie, ce type de béton présente un intérêt certain puisque les impératifs d'une meilleure qualité des ouvrages et aussi la complexité des coffrages commencent à se sentir de plus en plus ces dernières années.

La formulation de BAP se distingue de celle de BO, par une présence plus importante de volume de pâte (pâte = ciment+ fines+ eau+ adjuvant), il est caractérisé par une quantité de fines élevée et l'emploi des adjuvants nommés : super-plastifiant, haut réducteurs d'eau, plastifiants réducteurs d'eau, accélérateur de prise, accélérateur de durcissement, retardateurs de prise, entraîneur d'air, hydrofuge de masse et les produits de cure. Ces produits (liquides ou poudres), une fois ajoutés au béton en faible quantité (moins de 5%) permettent d'améliorer certaines propriétés : maniabilité ou qualité, compacité et résistance souhaitées soit sur béton frais, soit sur béton durci.

Dans ce mémoire cinq approches pour la formulation de BAP ont été mentionnées et expliquées, l'approche basée sur l'optimisation des mortiers, celle basée sur l'optimisation du volume de pâte, une autre basée sur l'optimisation du squelette granulaire, une approche basée sur un plan d'expérience et l'utilisation du Mortier du Béton Equivalent (MBE), pour formuler le BAP.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- ✚ Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur ce type de béton (BAP), la définition, les constituants, les propriétés recherchées dans un BAP à l'état frais et durci, la mise en œuvre, les avantages et les inconvénients du BAP.
- ✚ Le deuxième chapitre est consacré à la formulation du BAP, les facteurs influençant, les approches et les méthodes de formulation.
- ✚ Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation du BAP à l'état frais et durci et l'objectif de ces essais.

Enfin, ce mémoire est terminé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I :
Etude bibliographique sur BAP

I-1- Introduction :

La mise en place aisée, un bon remplissage des coffrages, et un parfait enrobage des armatures..., toutes ces propriétés ont toujours été recherchés dans un béton, soit par les maîtres d'œuvres, les architectes, les ingénieurs, ou les fabricants.

Pour l'obtention de ces caractéristiques, la vibration a toujours été le moyen de se faire. Les formulations de bétons ont dûes s'adapter devant la complexité croissante des structures, formes variées, forte concentrations d'armatures. Et malgré la réduction de la quantité d'eau de gâchage, la vibration n'est devenue plus nécessaire, les bétons sont devenus de plus en plus fluides. Par l'arrivée des dernières générations d'adjuvants les super-plastifiants, l'hyper fluidité du béton a été rendue possible [1].

Supprimer les opérations coûteuses liées à la vibration, et le ressuage afin d'accroître la productivité du chantier, et le besoin du développement d'un béton fluide qui ne nécessite pas des moyens de serrage lors de sa mise en place, tous ces intérêts techno-économiques étaient l'objectif de lancer de nouveau béton par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon vers les années 80 [2].

Plusieurs termes ont été utilisés pour ce nouveau béton :

- Béton Auto-Compactant (**BAC**).
- Béton hyper fluide
- Self-Compacting Concrete (**SCC**) en anglais.

Aujourd'hui, l'appellation la plus utilisée est le Béton Auto-plaçant (**BAP**) [1].

En Algérie, ce type de béton présente un intérêt certain, puisque les impératifs d'une meilleure qualité des ouvrages, et la complexité des coffrages commencent à se sentir de plus en plus ces dernières années [3].

I-2- Définition :

Le BAP est un béton capable sous l'effet de la pesanteur de se mettre en place dans les coffrages les plus complexes et très encombrés, ne nécessitant plus de vibration pour le compactage du mélange et comme résultat un produit très homogène [4].

Le BAP doit être capable de s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant, cela nécessite d'avoir un étalement et une vitesse d'étalement importante [5].

Avec une vitesse qui dépend de la viscosité du mélange, le BAP doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrés, pour cette condition ce type de béton doit être fluide (déformable). Cela est possible lorsque le rapport eau/ciment est élevé ou le béton contient un super-plastifiant.

La fluidité n'est pas la seule propriété recherchée, l'ensemble pâte-granulat doit être homogène, très cohésif et stable lors de la mise en place jusqu'au durcissement.

Donc le BAP doit présenter le minimum de tassement et de sédimentation des particules solides, et éviter de présenter un ressuyage trop fort, car ce dernier génère une hétérogénéité de ses propriétés mécanique, telle qu'une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celle situées en zone inférieure lors du coulage [4].

Dans les milieux ferraillés le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts et prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement [3].

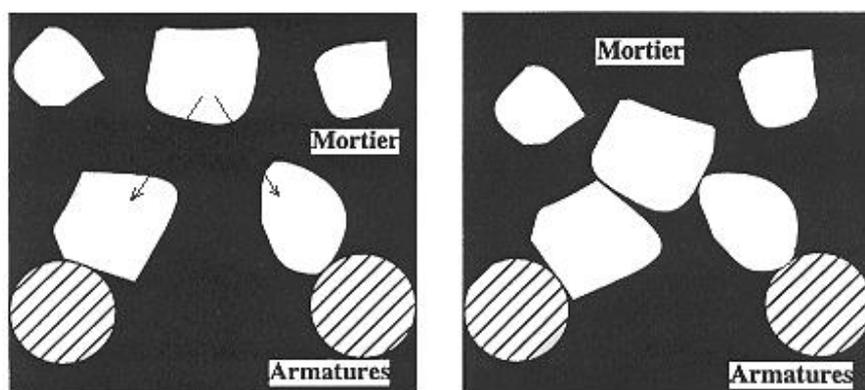


Figure I-1 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [5]

Aussi, les arcs peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage, pour éviter ceci, le BAP doit avoir une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en

zone confinée, et une résistance à la ségrégation statique pour l'homogénéité de ses propriétés mécaniques [5].

En générale, le BAP possède relativement, un même dosage en ciment et en eau que le Béton Ordinaire, ainsi qu'un volume de sable assez proche, mais avec un volume de pate (eau-liant) assez important.

Les proportions exactes de chaque constituant dépendent de la méthode de formulation choisie [3].

I-3- Constituants d'un BAP :

I-3-1- Le ciment :

Le ciment est un constituant de base du béton, est un liant hydraulique et une matière inorganique finement moulue, le ciment forme avec l'eau une pâte qui fait en réaction la prise et durci au processus d'hydratation, après durcissement la pâte de ciment conserve sa résistance et sa durabilité même dans l'existence de l'eau [6].

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique, il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20%.

Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de celle cuisson (clinkérisation) sont :

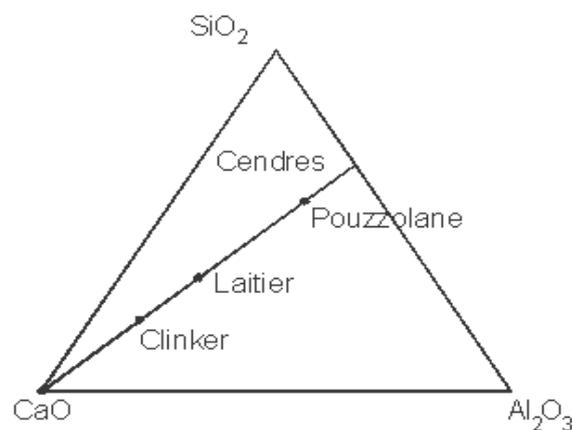
- Le silicate tricalcique, 3CaO.SiO₂.....C₃S
- Le silicate bicalcique, 2CaO.SiO₂..... C₂S
- L'aluminate tricalcique, 3CaO.Al₂O₃.....C₃A
- L'aluminoferrite tetracalcique, 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃..... C₄AF [4].

Tableau I-1 : Analyse chimique du ciment

| Eléments | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SiO ₃ | CaO libre | Perte au feu |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-----------|--------------|
| (%) | 18.9 | 4.35 | 3.58 | 62.34 | 1.30 | 1.72 | 0.62 | 6.38 |

Le ciment peut être constitué de :

- Laitier de haut fourneau (S).
- de pouzzolane naturelle (Z).
- cendres volantes siliceuses (V).
- Calciques (W)
- Fumée de silice (D)
- Calcaire (L)
- Schistes calcinés (T)
- Et de constituants secondaires comme sulfate de calcium (gypse, hémihdrates, anhydrite) et de l'additif. [4]

**Figure I-2: Triangle des compositions principales de ciments [7]**

Les ciments sont classés en fonction de leur composition en cinq types principaux définis par la norme EN 197-1 :

- ✓ CEM I : ciment portland.
- ✓ CEM II : ciment portland composé.

- ✓ CEM III : ciment de haut fourneau.
- ✓ CEM IV : ciment pouzzolaniques.
- ✓ CEM V : ciment au laitier et aux cendres [8].

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un BAP est soit :

- Le ciment portland CPA-CEM I 42.5 qui contient au moins 95% de clinker et un constituant secondaire.
- Le ciment portland composé CPA-CEM II/A et B42.5 dont l'apport en clinker est de 65% à 94%, le reste étant composé d'un ou plusieurs ajouts [4].

1-3-2 Les granulats

Les granulats (sable, gravier) constituent le squelette du béton, ils sont présentés comme un ensemble de grains minéraux, leur dimensions comprises entre 0 et 125 mm [9].

Les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Les granulats roulés en vrac présentent un plus petit volume de vide inter-granulaire, ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique, masse identique [10].

Leur origine peut être naturelle ou artificielle, on distingue les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières et les granulats concassés obtenus à partir des roches concassés exploitées en carrières [4].

Les granulats doivent être inertes chimiquement vis-à-vis du ciment, de l'air et de l'eau, la nature des roches constituent les gisements est responsable des propriétés intrinsèques des granulats comme masse volumique, résistance, porosité, réactivité.

La granularité et la forme des granulats sont en fonction du processus d'élaboration [9].

Le classement des granulats se fait selon les dimensions des grains qui les constituent, la courbe granulométrique représente la distribution des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

Pour le Béton Auto-Plaçant (BAP) et pour faciliter l'écoulement du mélange, généralement la confection d'un bon BAP utilise des granulats roulés de rivières et un apport de fine (comme fillers calcaires) plus importants.

Lorsque les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité des granulats est limitée. Dans un BAP le rapport granulat/sable généralement exprimé en masse est de 1.

Le risque de blocage dans un milieu fortement ferrillé augmente lorsque le D_{\max} augmente, le D_{\max} des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm [4].

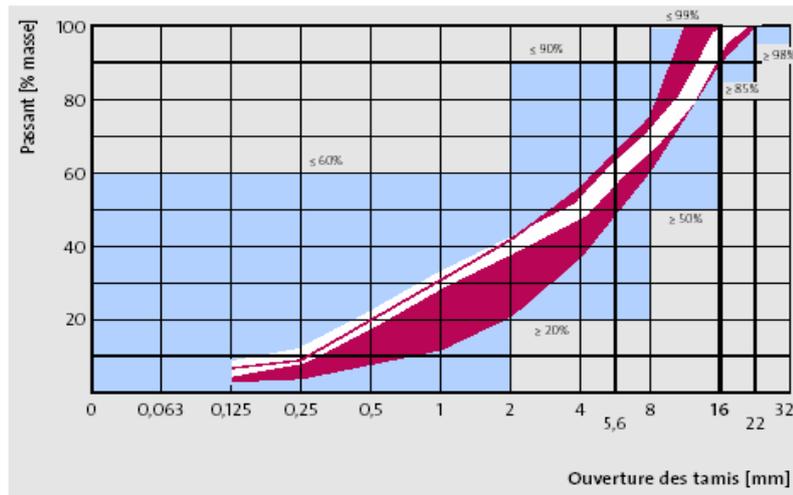


Figure I-3 : Choix de la granularité pour un BAP [11]

1-3-3 L'eau

L'eau sert à l'hydratation du ciment et à assurer une ouvrabilité suffisante du béton, il permet d'utiliser l'eau potable mais pas l'eau de mer [12].

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires ci-dessus :

- ✓ 2g/l pour les bétons à hautes résistance.
- ✓ 5g/l pour les bétons à faibles résistance.

Et aussi il ne doit pas contenir des sels dessous au-delà de :

- ✓ 15g/l pour les bétons à hautes résistance.
- ✓ 30g/l pour les bétons à faibles résistance.

La qualité de l'eau de gâchage peut avoir une influence sur le temps de prise, le développement des résistances du béton et la protection des armatures contre la corrosion [13]. Aussi le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, la perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinématique d'hydratation [1].

1-3-4 Les adjuvants

Les adjuvants de béton sont des produits chimique solubles dans l'eau qui modifiant principalement les solubilités, les vitesses de dissolution, et l'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique [13].

Aussi les adjuvants sont des matériaux ajoutés en très petite quantité (souvent liquide) dans le but d'influence certaines propriétés par une action chimique ou physique. Ils ne doivent pas modifier défavorablement la durabilité du béton ou toute autre propriété du béton [2].

De plus en plus, l'utilisation d'adjuvants fluidifiants permet la conception de béton possédant une ouvrabilité supérieure avec un rapport E/C de plus en plus faible [13].

L'emploi d'un adjuvant ne peut entraîner une diminution de certaines caractéristiques du béton que dans les limites précisées par la norme .Il ne doit pas non plus altérer les caractéristiques des armatures du béton ou des aciers de précontrainte.

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule, caractérisée par la ou les modifications majeures qu'il apporte aux propriétés des bétons, des mortiers ou des coulis, à l'état frais ou durci. L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier en fonction de son dosage et des composants du béton.

Un adjuvant présente généralement une ou plusieurs fonctions secondaires qui sont le plus souvent indépendantes de la fonction principale. L'emploi d'un adjuvant peut aussi entraîner des effets secondaires non directement recherchés.

Aussi un adjuvant réducteur d'eau peut avoir une fonction secondaire de retardateur de prise [14].

La classification des adjuvants est fait à partir de leur fonction principale, il y'à :

- ✚ Plastifiant.
- ✚ Plastifiant-réducteur d'eau.
- ✚ Fluidifiant.
- ✚ Entraîneur d'air.

Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton :

On trouve :

- ❖ Les plastifiants-réducteurs d'eau.
- ❖ Les super-plastifiants/haute réducteurs d'eau.
- ❖ Les adjuvants rétenteurs d'eau.

Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement :

- ❖ Accélérateurs de prise.
- ❖ Accélérateurs de durcissement.
- ❖ Retardateur de prise.

Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton :

- ❖ Les entraîneurs d'air.
- ❖ Hydrofuge de masse.

Et finalement il y'a les produits de cure [2].

Pour la formulation de Béton Auto-Plaçant (BAP) les deux adjuvants nécessaires sont les super-plastifiants et l'agent colloïdal ou de viscosité [1].

a- Les super-plastifiants

Selon la norme NA 774, un super-plastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou coulis, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange.

L'action d'un super-plastifiant passe nécessairement par son adsorption sur les particules de ciment. [15]

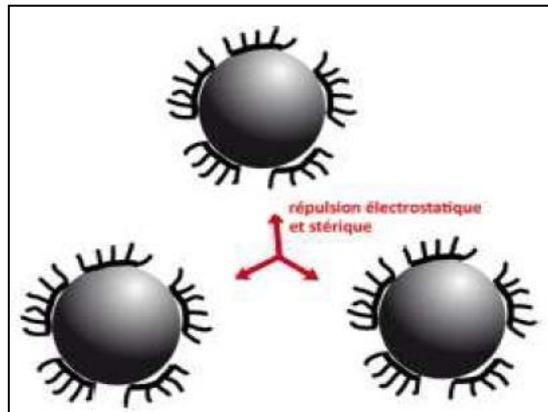


Figure I-4 : Répulsion électrostatique entre les particules de ciment [16]

En tant qu'adjuvant, les super-plastifiants peuvent avoir plusieurs fonctions dans un mélange cimentaire, la fonction de base est la fluidification car ils provoquent un important gain d'ouvrabilité de mélange [15].

Ils ne changent pas la capacité d'hydratation de la pâte cimentaire [17]. Les super-plastifiants sont responsables d'un effet de plastification, à même teneur en eau, il permet d'augmenter l'ouvrabilité de la pâte du mortier ou du béton sans diminuer les résistances à long terme.

La fonction 'réducteur d'eau' se manifeste par la réduction du rapport E/C pour une même ouvrabilité, cette fonction permet d'augmenter les performances mécaniques du mélange [9].

L'utilisation de super-plastifiant permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton, tout en conservant de bonnes performances mécaniques des matériaux [18].

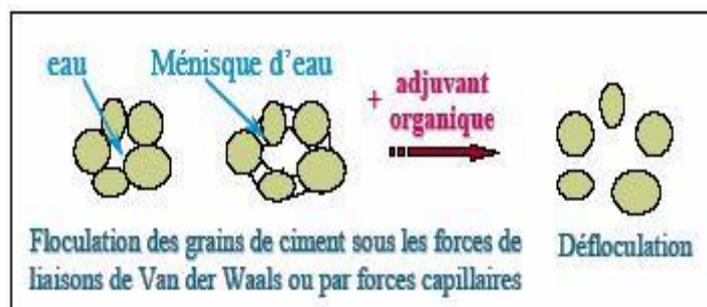


Figure I-5 : Floculation des grains de ciment [19]

Aussi l'utilisation des adjuvants dans l'industrie moderne est devenue une nécessité pour l'obtention des propriétés désirées, cependant l'incorporation des super-plastifiants au béton peut modifier la cinématique d'hydratation et favoriser le dégagement de chaleur [20].

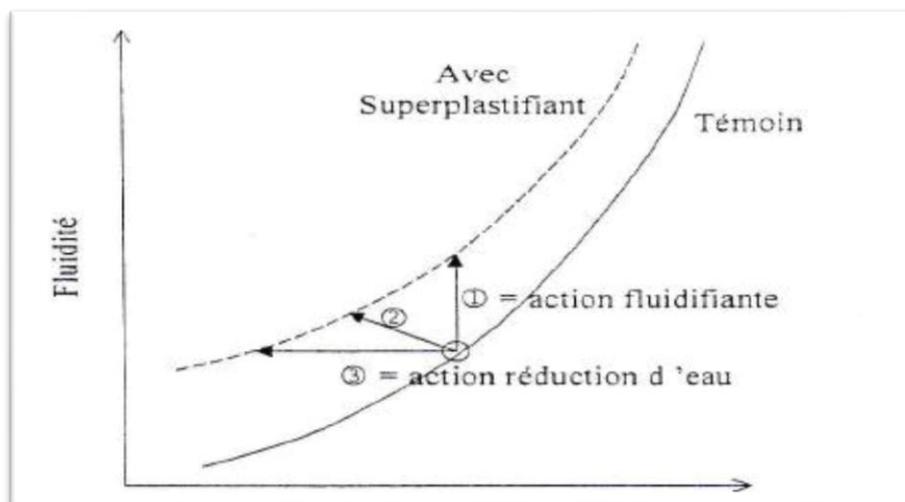


Figure I-6: Les utilisations des super-plastifiants [18]

- 1 : Augmentation de la fluidité (teneur en eau égale).
- 2 : Diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité.
- 3 : Diminution de la teneur en eau (à fluidité égale) [18].

Les super-plastifiants permettent de répondre à deux types d'applications, selon que l'utilisateur travaille dans le domaine de la préfabrication ou du béton prêt à l'emploi. Dans le premier cas, il aura besoin d'un béton qui acquiert des propriétés mécaniques importantes de façon très rapide afin de procéder au démoulage dans les délais les plus brefs et en même temps d'un béton assez fluide pour avoir une mise en place convenable dans les moules. Dans le deuxième type d'utilisation, le béton devra pouvoir être transporté sur des parcours plus ou moins longs et présenter de bonnes propriétés de mise en œuvre sur le site de construction sans que les performances mécaniques ne soient affectées [21].

Il apparaît que les bétons modernes doivent satisfaire à la fois aux exigences de résistance et de maniabilité. Il s'agit de deux caractéristiques apparemment inconciliables puisque sans l'ajout de super-plastifiant, l'augmentation des résistances ne s'obtient qu'avec une réduction d'eau. Or, une réduction d'eau diminue la fluidité. Un gain de maniabilité ne peut être obtenu qu'en augmentant la quantité d'eau de gâchage et donc au détriment des résistances finales du matériau [22].

Tableau I-2 : Les paramètres rhéologiques des pâtes de différents dosages en SP [19]

| | PAP-40sp | PAP-20sp | PAP réf | PAP+20sp | PAP+40sp |
|---------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| $\tau_0 (Pa)$ | 7,6995 | 1,8008 | 0,6331 | 0,3757 | 0,1366 |
| $\mu (Pa s)$ | 10,272 | 2,5637 | 1,612 | 1,1203 | 0,5867 |
| N | 0,5867 | 0,855 | 0,96 | 1,0207 | 1,1388 |

b- L'agent colloïdal (agent de viscosité) :

L'utilisation des agents de viscosité dans la formulation de béton auto-plaçant est devenue récemment une nécessité pour garantir une bonne résistance à la ségrégation du béton, sans pour autant 'nuire' à la fluidité qui est assurée par l'utilisation des super-plastifiants. En effet, ces derniers augmentent souvent les risques de ségrégation des bétons, et la séparation des phases entre les constituants peut être la conséquence d'un manque de cohésion entre les phases [9].

Ces produits sont dérivés de la cellulose et de polysaccharides microbiens, solubles dans l'eau. Ils sont utilisés dans les mélanges de béton afin d'augmenter la viscosité.

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

Ces produits sont composés de longues chaînes de polymères qui se fixent sur les molécules d'eau et par enchevêtrement, augmentent la viscosité de l'eau. Quand la vitesse de cisaillement croît, les chaînes ont tendance à s'aligner, ce qui diminue la viscosité.

La stabilité des mélanges de béton s'accroît avec la teneur en agent colloïdal, on assiste à une diminution des taux de ressuage externe et du tassement [23].

En générale, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de super-plastifiant croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage trop important en agent de viscosité empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité, il peut conduire aussi 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 estimé à environ une heure [24].

Tableau I-3 : Les paramètres rhéologiques des pâtes de différents dosages en AV [19]

| | PAP-40 AV | PAP réf | PAP+40 AV |
|---------------|-----------|---------|-----------|
| τ_0 (Pa) | 0,8848 | 0,6331 | 0,7851 |
| μ (Pa s) | 1,715 | 1,612 | 1,6855 |
| H | 0,9312 | 0,96 | 0,9272 |

c- Ajouts minéraux (Additions minérales) :

Les ajouts cimentaires sont généralement des produits et des sous-produits minéraux qui peuvent être naturels ou artificiels [23].

Les additions minérales permettent ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières [25].

Certaines additions minérales à forte surface spécifique adsorbent une quantité importante de super-plastifiant, (la fumée de silice).

Certaines additions minérales absorbent peu de super-plastifiant mais sont utilisées en forte quantité dans un béton.

Le dosage de saturation du béton peut dépendre de façon importante de celui de l'addition [26].

L'incorporation d'ajouts cimentaires peut se faire lors de la fabrication de ciment composé ou dans une centrale à béton au moment de la fabrication du béton, de côté économique, les ajouts sont généralement moins chers par rapport au ciment portland, et leur substitution partielle contribue à une diminution importante du coût de production du ciment portland.

Il existe deux types d'ajouts minéraux :

- Type I : Additions quasiment inertes
- Type II : Pouzzolanes et additions à caractère hydraulique latent.

Les agents les plus utilisés sont en générale :

- Les pouzzolanes, c'est-à-dire des matériaux à grande surface spécifique qui présentent des structures amorphes.
- Les chaux, et en présence d'eau ils donnent des composés hydratés suivant une réaction exothermique, à condition que le niveau d'énergie libre au départ soit suffisamment élevé pour aboutir à un système plus stable ayant des propriétés hydrauliques [23].

❖ **Fumée de silice** :

La silice réactive, prend son origine des granulats, toutes les variétés de silice sont pratiquement insolubles dans l'eau pure, mais en raison du caractère acide de SiO_2 , certaines peuvent se dissoudre sous forme d'anions dans les solutions aqueuses fortement basiques.

La présence d'une silice solubilisable provenant des minéraux sensibles pouvant réagir avec les alcalins, est l'origine de la majorité des réactions alcali-granulats.

Le minérale plus susceptible de réagir avec les alcalins est l'opale ayant comme formule $(\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O})$, ou une silice amorphe.

En générale, la silice peut être rencontrée dans les roches et alluvions siliceuses, dans les roches carbonatées (sous forme d'inclusion), et dans les roches ou alluvions silicatées polyphasées.

L'identification de ces roches n'est pas suffisante pour permettre de caractériser un granulats comme réactif. Cette première approche absolument nécessaire, permet tout au plus d'alerter sur l'existence ou non d'un risque.

Dans l'affirmative, ce sont les essais de stabilité dimensionnelle qui permettent la décision [27].

Tableau I-4: Echantillon de diverses compositions des fumées de silice dans le mortier [19]

| Fumées de silice | | Fumée de silice 1 | Fumée de silice2 | Fumée de silice3 |
|--|--------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Surfaces spécifiques (m ² /g) | | 14,2 | 21,6 | 22,2 |
| Composition Chimique | SiO ₂ | 91,50% | 88 ,75% | 97 ,35% |
| | Al ₂ O ₃ | 5,78% | 0,08% | 0,03% |
| | Fe ₂ O | 0,16% | 1,60% | 0,12% |
| | MgO | 0,03% | 1,48% | 0,19% |
| | CaO | 0,8% | 0,66% | 0 ,10% |
| | Na ₂ O | 0,12% | 0,71% | 0,12% |
| | K ₂ O | 0,08% | 2,41% | 0,23% |
| | ZrO ₂ | 1,10% | -- | -- |
| | alcalins | 0,20% | 3,12% | 0,35% |
| | carbone | -- | 1,59% | 1,06% |
| Temps d'écoulement (sec) | | 2 | 7,5 | 5 |
| Résistance en compression | | 113 MPa | 87 MPa | 101 MPa |

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, ses particules se présentent sous forme de sphère ayant un diamètre moyen de 0.1µm, soit 100 fois plus faibles que le diamètre moyen d'une particule du ciment. Elle apparaît sous forme de billes sphériques. Dont la densité est :

- ✓ Densité apparente sans traitement : 0.10 à 0.20.
- ✓ Densité apparente après densification : 0.40 à 0.70.

✓ Densité réelle : 2.30

Et la couleur est :

- ✓ Gris clair à blanc pour certaines fumées.
- ✓ Couleur avant traitement de densification $L^* = 62$.
- ✓ Couleur après traitement de densification $L^* = 37$ pour $d = 0.60$ [28].

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice (plus de 90%) de son état amorphe et de sa finesse très élevée.

L'incorporation de fumée de silice dans un béton a pour effet de :

- Diminuer le ressuage.
- De modifier la microstructure de la pâte de ciment hydraté qui paraît massive et quasiment amorphe.
- De consolider la zone de transition autour des granulats, un des points faibles des bétons de rapport E/L élevé.

De ce fait, la présence de la fumée de silice entraîne une augmentation de la résistance en compression particulièrement entre 7 et 28 jours.

Les fumées de silice agissent de trois façons dans les bétons :

- ✓ Action physique.
- ✓ Action physico-chimique.
- ✓ Action pouzzolaniques [23].

Les fumées de silice sont capables d'intervenir selon deux mécanismes :

- ✓ L'effet granulaire : Les particules de la fumée de silice étant sphériques, lisses et très petites, viennent combler les interstices entre les grains de ciment. C'est grâce à un produit dé-floculant que cet effet granulaire peut être obtenu et conduira à une réduction importante de la teneur en eau. C'est la forme de ces particules qui va aider à la mise en place des bétons.
- ✓ L'effet pouzzolaniques : La fumée de silice, amorphe et riche en silice, peut se combiner à la chaux lors de l'hydratation du ciment, afin de donner des hydrates

supplémentaires. Ce mélange permettra d'obtenir des bétons à haute et très haute performance [28].

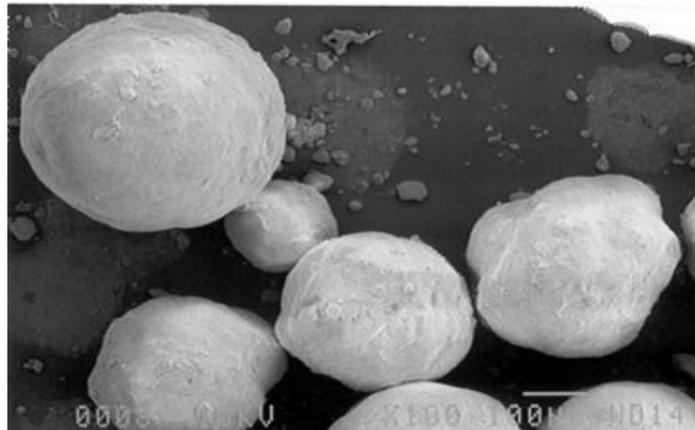


Photo I-1 : Fumée de silice au microscope à balayage électronique [28]

❖ Cendres volantes :

Ce sont les pouzzolanes artificielles les plus courants, elles sont générées par la combustion du charbon pulvérisé, utilisé dans les centrales thermiques. De par leur forme sphérique et leur diamètre compris entre 1 et 100 μ m, les cendres volantes contribuent à l'amélioration des propriétés, surtout la maniabilité du béton frais, et peuvent grandement réduire la pénétration des ions chlorures, les cendres volantes sont divisées en deux grandes catégories selon leur composition chimique.

- La classe F riche en oxyde ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$) avec une teneur faible en chaux ($\text{CaO} < 10\%$), elle est qualifiée de silico-alumineuse avec une faible potentiel pouzzolaniques.
- La classe C riche en chaux ($\text{CaO} > 10\%$), avec une teneur en oxyde supérieure à 50%, elle est qualifiée de silico-calcaire avec un potentiel pouzzolaniques élevé [23].

L'utilisation des cendres volantes dans le béton permet d'atteindre plusieurs objectifs:

- Réduire la quantité de ciment utilisée et donc diminuer les coûts.
- Réduire la chaleur d'hydratation.
- Améliorer la maniabilité du béton.
- Améliorer l'acquisition des performances mécaniques à long terme.

- Améliorer la durabilité.

Deux voies sont employées pour les incorporer au béton :

- Utiliser un mélange de ciment aux cendres volantes.
- Utiliser les cendres en tant que composant supplémentaire du béton, c'est-à-dire en tant qu'additions de type II [29].

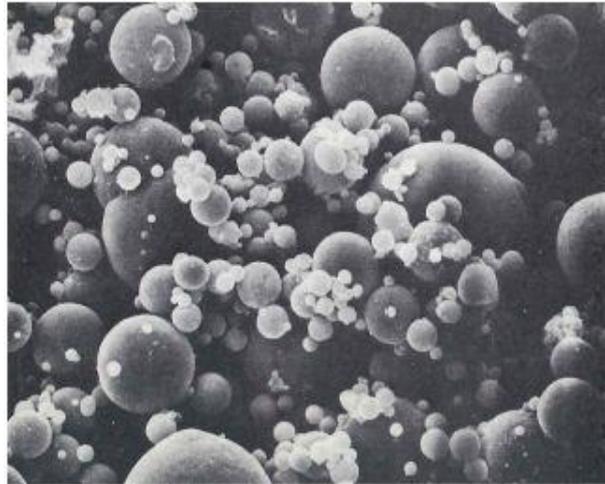


Photo I-2 : Microstructure des particules des cendres volante [29]

❖ **Laitiers de haut-fourneau** :

Les laitiers des haut-fourneau sont des résidus provenant de l'industrie de fer. Le laitier est le résultat de la fusion du fondant (pierre à chaud ou dolomite) avec la gangue (résidus silico-alumineux du minerai de fer), et les résidus de coke dans le haut-fourneau.

Ce sont des silico-aluminates de chaux traités de différentes façons à la sortie du haut-fourneau :

- ✓ Par refroidissement brusque dans l'eau ou dans l'air : ceci empêche la cristallisation et permet son utilisation dans les ciments et les bétons comme pouzzolane.
- ✓ Par refroidissement lent à l'air : ceci donne un matériau cristallisé sans aucun pouvoir liant qui est utilisé comme granulat pour les travaux routiers et dans les bétons.

Une fois séché et broyé, le laitier ayant subi une trempe à l'eau contribue par sa composition minéralogique et chimique à améliorer certaines qualités du béton.

Son effet sur les bétons frais et durci est proportionnel à son pourcentage de substitution et à sa finesse [23].

Après refroidissement en fosse, le laitier cristallisé brut est concassé et criblé pour réduire des granulats.

Les différents matériaux élaborés à partir de laitier de haut-fourneau cristallisé sont :

- ✓ Des granulats d/D en toutes granulométries.
- ✓ Des granulats 0/D, 0/d en toutes granulométries [30].



Photo I-3 : Granulation du laitier de haut fourneau d'ELHADJAR [31]

❖ **Fillers calcaires** :

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide, ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. Le rôle propre du super-plastifiant est essentiellement la défloculation (grâce à ses propriétés dispersantes), ce qui engendre des grappes d'ultrafines qui se forment lors du gâchage et leur permet ainsi de jouer leur rôle granulaire [32].

Les fillers calcaires sont des produits à haute teneur en calcaire, elles sont utilisées pour combler les vides dans la portion fine de la distribution granulaire [23].

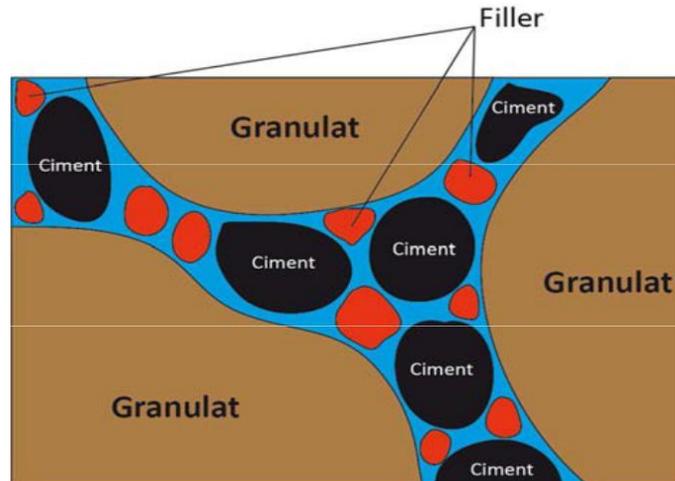


Figure I-7 : Illustration de l'effet filler [33]

Aussi on désigne souvent par fillers des matières inertes qui en milieu neutre ou alcalin, sont dans une large mesure insolubles, elles n'ont pas de réactions chimiques et ne contribuent pas directement au développement de la résistance des bétons, elles peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques, hydrauliques latentes ou pouzzolaniques, elles ne doivent pas accroître sensiblement la demande en eau, du ciment, ni diminuer en aucune manière la résistance du béton ou du mortier à la détérioration, et la protection des armatures contre la corrosion [34].

Les fillers calcaires permettent d'améliorer les propriétés du béton :

- ✓ Meilleure Pompabilité.
- ✓ Résistance à la ségrégation.
- ✓ Réduction de la porosité.
- ✓ Meilleure qualité de surface [35].

Tableau I-5 : critères sur les propriétés physiques [33]

| Propriétés | Passant à 63 μ m | Blaine |
|------------|----------------------|--------------------------|
| Critères | > 63% | > 2000cm ² /g |

Tableau I-6 : critères sur les propriétés chimiques [33]

| Propriétés | Indice d'activité | Teneur CaCO ₃ | Valeur de Bleu | Teneur en total sulfate |
|------------|-------------------|--------------------------|----------------|-------------------------|
| Critères | > 62% | >0,68 | < 1,3 g/100g | < 0,15% |

d- Autres additions

En plus des additions minérales indispensables caractérisant la composition de la pâte de ciment du BAP, les additions inertes suivantes sont aussi parfois utilisées:

- ✓ les pigments pour la coloration d'éléments architectoniques
- ✓ les fibres d'acier comme armature constructive
- ✓ les fibres de polyéthylène (fibres PE) pour améliorer la résistance au feu
- ✓ les fibres de polyéthylène ne (fibres PP) pour empêcher les fissures de retrait plastique [10].

1-4 Propriétés recherchés dans un BAP à l'état frais :**1-4-1 Déformabilité :**

La déformabilité du béton, ou autrement dit le remplissage, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton auto-plaçant doit être capable de remplir les vides et les espaces difficile dans un milieu confiné, il se déforme sous l'effet de son propre poids, et sans vibration externe ou interne [36].

Cette déformabilité dépend de plusieurs paramètres : la forme des granulats, le type de ciment, la teneur en eau, le rapport S/G, les adjuvants et la résistance à la ségrégation [23].

La déformabilité ou le ressuage est observée sous deux aspects :

- ✓ La capacité de remplissage : elle est liée à la capacité de déformation du béton, cet aspect traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace.
- ✓ La vitesse de remplissage : elle est liée à la vitesse de déformation, cet aspect ainsi traduit la vitesse d'écoulement du béton.

Pratiquement, le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects, car le diamètre final atteint par la galette de béton correspond à la capacité de déformation, et le temps de passage à un certain diamètre correspond à la vitesse de la déformabilité du béton [36].

On distingue deux types de déformabilité :

a- Déformabilité libre :

Elle est définie par l'aptitude du béton à s'écouler sous son propre poids sans risque de ségrégation, et avec un débit suffisant en milieu infini.

Selon Ozawa et Coll, la déformabilité libre est en fonction de la quantité d'eau qui n'est pas liée, ni chimiquement ni physiquement par le béton [23].

b- Déformabilité restreinte :

Elle se caractérise par la faculté du béton à traverser les passages étroits avec le minimum de friction possible, c'est-à-dire sans risque de blocage. Ce risque est le résultat de l'hétérogénéité d'un béton causée, soit par une mauvaise formulation, soit par une mauvaise application. Il faut qu'il présente une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement dans une zone confinée.

D'autre part, il faut s'assurer du maintien de la déformabilité des BAP au cours de leur mise en place jusqu'au début de la prise (stabilité statique) [23].

1-4-2 Stabilité :

La stabilité est l'une des propriétés les plus recherchées pour les BAP, elle caractérise l'habileté de maintenir en suspension les particules fines et grossières sans risque de tassement pour l'ensemble. La stabilité du béton est en fonction de la capacité granulaire et de l'eau libre.

Il existe deux types de stabilité dans le système du béton, la stabilité dynamique (résistance à la ségrégation), et la stabilité statique (résistance au ressuage et tassement) [23].

a- Stabilité dynamique :

Le mécanisme de la stabilité dynamique est expliqué par le phénomène de la ségrégation.

La ségrégation est un phénomène de séparation des constituants d'un béton frais, qui peut être provoqué par un malaxage insuffisant ou par une vibration excessive ^[37]. Aussi apparaît dans un mélange quand des différences des propriétés entre les particules imposent un mouvement préférentiel de certaines d'entre elles dans une certaine partie du mélangeur [38].

La ségrégation peut être se manifester comme :

- ✓ La séparation entre la pâte et les granulats.
- ✓ La séparation entre le gravier et le mortier, qui peut conduire à un blocage en zone confiné.
- ✓ Une séparation non homogène de l'air occlus.

On peut augmenter la résistance à la ségrégation, en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certain agent de viscosité [36].

Or il existe deux types de ségrégation : la ségrégation statique et la ségrégation dynamique.

❖ **Ségrégation statique :**

La ségrégation statique est une mauvaise répartition des particules fines et grossières sous l'effet du poids du béton. Un BAP doit donc avoir une bonne résistance à la ségrégation statique, une fois mise en place jusqu'à sa prise, pour des raisons évidents d'homogénéité de ses propriétés mécaniques [23].

❖ **Ségrégation dynamique :**

La ségrégation dynamique se produit lors de l'écoulement du béton en contact avec un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier n'est pas assez résistant, d'où les voûtes qui peuvent se former par contact avec le solide qui peuvent se colmater avec des parties fines et causer ainsi l'interruption de l'écoulement.

Les facteurs pouvant réduire la ségrégation tout en augmentant la stabilité sont :

- ✓ Augmenter les proportions du liant.
- ✓ Employer une teneur en eau optimale.
- ✓ Utiliser des agrégats bien gradués et de faible diamètre.
- ✓ Optimiser la compacité granulaire.

- ✓ Optimiser la viscosité du mélange.

b- Stabilité statique :

❖ Tassement :

La stabilité statique est souvent expliquée par le test de tassement, qui permet d'évaluer l'habilité du béton à maintenir en suspension les fines particules par un suivi dans le temps de son tassement durant la prise. [23]

❖ Le ressuage :

Le ressuage est une forme de ségrégation au cours de laquelle une partie de l'eau de gâchage remonte à la surface du béton fraîchement mis en place [23].

Ce processus est dû à une formulation insuffisante en fines [37].

Selon Khayat et Coll [23], le ressuage est le résultat d'un tassement progressif du béton frais sous l'effet de son propre poids, l'eau étant expulsée comme le serai d'eau d'une éponge légèrement pressée.

Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation (statique et dynamique), et au ressuage afin qu'il reste homogène. Pour remédier au problème du ressuage, Khayat et Coll [23], ont étudié l'influence du dosage en agent colloïdal sur le tassement du béton frais et ils ont montré que le tassement diminue avec l'augmentation de la teneur en agent colloïdal.

Par contre, un dosage trop élevé en agent colloïdal provoque une diminution de la fluidité du béton. Pour cela Khayat préconise l'utilisation d'un agent de viscosité en présence d'un super-plastifiant. Le ressuage peut aussi être réduit en utilisant des granulats bien gradués ou à l'aide d'ajouts minéraux [23].

Pour éviter la ségrégation, le BAP doit être présenté :

- ✓ Un haut de cisaillement, qui contrecarre les forces de sédimentation.
- ✓ Une viscosité élevée, qui réduit le taux de sédimentation.
- ✓ Une bonne thixotropie, qui peut stopper la sédimentation.
- ✓ Un effet d'échelle par un mélange stable de petites et moyennes tailles de particules qui bloquent la chute des gros gravillons.

1-4-3 Pompabilité :

Les BAP sont généralement pompables, le pompage apparaît comme le moyen de transport naturel de ces bétons, il faut donc s'assurer de leur Pompabilité.

Selon De-Larrard considérait les bétons comme des fluides Binghamiens de caractéristiques μ et Z , et qui se déplace dans un tuyau en régime laminaire. Cependant, son étude a montré que le débit de Pompabilité dépend peu de seuil, mais qu'il est contrôlé principalement par la viscosité plastique (μ).

Il a été constaté qu'à de faibles taux de pompage, la perte de pression est équivalente pour un béton conventionnel et pour un BAP, mais cette perte devient plus importante dans le cas du BAP avec l'augmentation de taux de pompage [23].

1-4-4 Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP :

La connaissance du comportement rhéologique est essentielle pour caractériser l'écoulement d'un béton. Le béton peut être décrit comme une suspension de particules de différentes tailles, constituée d'une phase solide et d'une phase liquide. La définition des phases solides et liquides peut varier selon l'approche ou l'échelle de taille des particules. Comme exemple on peut considérer du gravier (phase solide) et du mortier (phase liquide) ou à une échelle différente, du granulat et de la pâte. Lorsqu'on étudie la rhéologie de la pâte, on peut considérer l'ensemble des fines (phase solide) baignant dans l'eau (phase liquide).

Ainsi, le comportement rhéologique peut être étudié à différents niveaux : le béton, le mortier, la pâte et le fluide (mélange de l'eau et des adjuvants qui contiennent une fraction de molécules).

La rhéologie permet de caractériser le comportement du béton au cours de la mise en œuvre en le considérant comme un milieu continu. Elle permet donc d'analyser l'écoulement en étudiant les contraintes et les déformations subies par le matériau [9].

Le comportement rhéologique d'un matériau est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des certaines appliquées, appelée seuil de cisaillement τ_0 . Le fluide est considéré comme 'Binghamien' si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad \text{Equation I-1}$$

Avec τ : La contrainte de cisaillement en (Pa).

μ_p : La viscosité plastique en (Pa. S⁻¹)

γ : La vitesse de déformation (S⁻¹)

Pour le BAP, certaines études ont montré que leur équation de comportement suit le modèle de Herschel-Bulkley dont l'équation de comportement est:

$$\tau = \tau_0 + a \gamma^b \quad \text{Equation I-2}$$

Où a et b sont des constituants de comportement [36].

a- Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement est une contrainte tangentielle qui s'exerce à la surface d'une couche de matériaux en écoulement lors d'un mouvement laminaire de cisaillement. En régime laminaire, en effet, un mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres est engendré.

b- Vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement, ou aussi gradient de vitesse (γ'), représente la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement. Elle correspond à la vitesse de déformation de deux couches successives d'un matériau qui a subi cisaillement [25].

c- Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le matériau s'écoule. Pour une contrainte de cisaillement plus faible, le matériau se comporte comme un solide et ne s'écoule pas. Il existe différentes méthodes pour mesurer le seuil de cisaillement, qui mènent parfois à des notions physiquement différentes [9].

Le seuil de cisaillement statique (au repos) est le premier seuil à mesurer sur un échantillon vierge de tout cisaillement ultérieur à l'exception du malaxage et des opérations de mise en route de l'essai. Il correspond à la contrainte à appliquer pour obtenir le premier signe d'écoulement. Le seuil statique est déterminé en imposant à la suspension une contrainte croissante jusqu'à la valeur impliquant son écoulement.

Cependant, le seuil de cisaillement dynamique est obtenu théoriquement par une extrapolation de la courbe d'écoulement à un gradient de vitesse nul [25].

d- Viscosité

La viscosité est définie comme la résistance à l'écoulement de la matière, la viscosité μ est définie généralement comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient de vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ correspond :

$$\mu = \tau / \dot{\gamma} \quad \text{Equation I-3 [9].}$$

La viscosité plastique (μ_p) est définie comme étant la pente de la courbe d'écoulement à chaque point. Pour le modèle de Bingham, la viscosité plastique (μ_p) est une constante, car la courbe d'écoulement est une droite. Cependant, pour le modèle d'Herschel-Bulkley, la viscosité plastique est variable pour chaque point, elle est la dérivée par rapport au gradient de vitesse de l'équation de la contrainte de cisaillement, son expression est donnée par l'équation :

$$\mu_p = n * k * \dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{Equation I-4}$$

1-5 Propriétés recherchés dans un BAP à l'état durci :

Les particularités de composition de béton auto-plaçant conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ce béton et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles de bétons vibré [5].

I-5-1 Propriétés mécaniques :

Selon des nombreuses études, les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition.

De façon plus exacte, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases :

- ✓ La pâte de ciment durcie, ou mortiers.
- ✓ Les granulats, ou inclusions.

Les propriétés de ce mélange (module d'élasticité, retrait, fluage), dépendent des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage, de leur retrait [5].

a- Résistance mécanique :

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les super-plastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un

effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

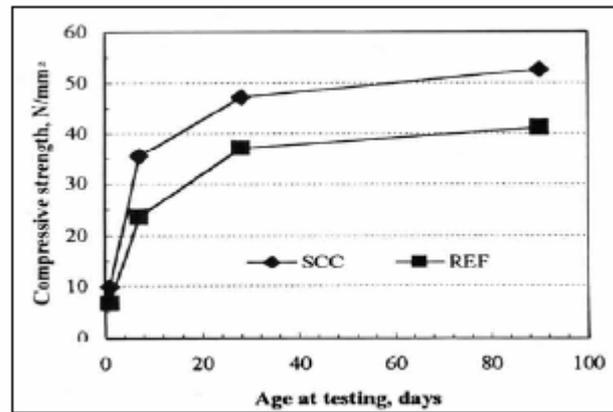


Figure I-8 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BO [39]

b- Module d'élasticité (en compression) :

Le module d'élasticité du béton dépend de modules de Young des différents composants, et de leurs pourcentages en volume.

Le module d'élasticité de BAP peut être jusqu'à 20% inférieur par rapport au BO ayant la même résistance en compression et fabriqué par les mêmes granulats.

Les valeurs de déformation à la rupture très proches pour le BAP et le BO, parallèlement au volume de pâte, aussi une diminution du module de Young avec l'augmentation du rapport E/L. [40]

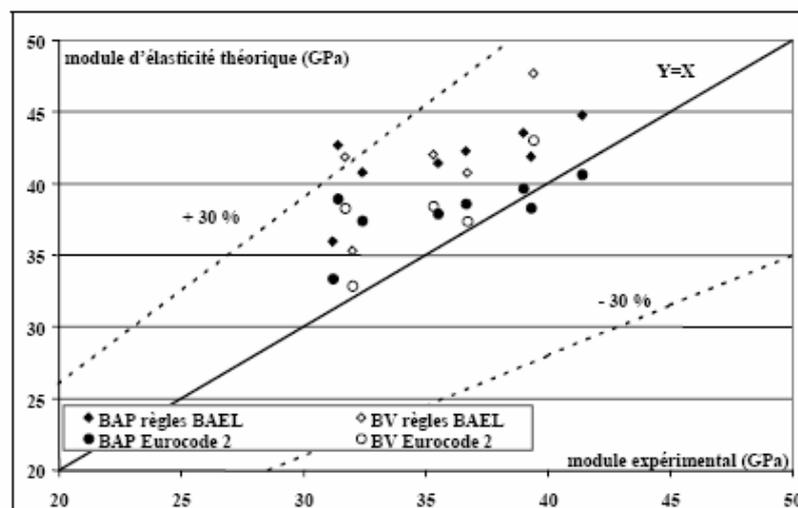


Figure I-9: Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et BO avec leur valeur expérimentales [39]

c- Retrait :

Considérons le volume de pâte plus important qu'il contient le BAP susceptible d'être plus déformable que le BO, les recherches montrent une tendance au retrait total plus important pour le BAP.

On distingue trois types de retrait :

- ✓ Retrait plastique.
- ✓ Retrait endogène.
- ✓ Retrait de dessiccation.

Le retrait endogène de BAP semble être inférieur ou égale à celui de BO, et le retrait de séchage est plus élevé, ce dernier 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 [41].

d- Résistance à la traction :

La particularité de BAP peut entraîner des variations de résistance, la quantité de fines ou le volume de sable peuvent influencer la résistance en traction. Ils montrent que l'augmentation de la quantité de sable et / ou du volume de fines entraîne une élévation de la résistance en traction.

En effet, la résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. La microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisées pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus.

La porosité de l'auréole de transition de BAP est inférieure à celle de BO. Par conséquent la résistance en traction de BAP est supérieure à celle de BO [42].

I-5-2 Propriétés physico-chimique :

La prise en compte de la durabilité d'un ouvrage est indispensable pour garantir une durée de service et conserver les fonctions d'usage. Quelques études traitent de la durabilité de BAP, les recherches dans ce domaine concernent :

- La microstructure.
- La perméabilité.
- La migration et la diffusion des ions chlorures.
- L'absorption d'eau.
- La résistance avec cycles de gel-de-gel [42].

1-6 Mise en œuvre et précautions d'emploi :

I-6-1- Mise en œuvre :

Dans l'ensemble, la mise en place d'un béton auto-plaçant est moins contraignante que celle d'un béton classique ou dit béton obtenu par vibration, Béton Ordinaire BO, car son coulage est plus aisé sur de grandes distances et hauteurs.

Du fait de l'hyper-fluidité des BAP, des dispositions sont cependant à prendre lors de son transport pour éviter des déversements, et lors de sa mise en œuvre [43].

L'extrême fluidité des BAP nécessite de soigner particulièrement l'étanchéité des coffrages ^[44], et éventuellement d'en renforcer le pied afin d'augmenter leur résistance à la pression. Il faut aussi prendre en compte que l'ouvrabilité des BAP est temporaire, il doit être suffisamment fluide à la fin du coulage pour garder ses propriétés auto-plaçant. Il ne peut subir aucune vibration puisqu'elles risqueraient de provoquer une ségrégation du béton [43].

Les propriétés d'écoulement des BAP donnent lieu à la mise en place de nouvelles procédures de remplissage des coffrages, les caractéristiques du BAP autorisent des cheminements horizontaux importants. Le pompage permet une mise en œuvre plus rapide du béton. Il est important de vérifier que la poussée lors du coulage du béton ne dépasse pas les limites de résistance des coffrages et les dimensionner pour résister à la pression quasi hydrostatique.

Dans certains cas (voile de très grande hauteur avec de très nombreuses ouvertures), le coffrage doit être spécifiquement étudié [44].

I-6-2- Précautions d'emploi :

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

- Préparation et organisation spécifiques du chantier et évolution des méthodes traditionnelles de construction : matériels, personnels, utilisation de la grue, phasage de réalisation, calages rigoureux des armatures et des réservations.
- Emploi de coffrages propre (absence de graisse, de laitance et de rouille).
- Parfaite étanchéité des coffrages (talonnettes, joints spéciaux).
- Renforcement des coffrages et des étalements pour résister à la pression en pied de coffrage pendant le coulage.
- Utilisation d'agents de démoulage de qualité, afin d'éviter les phénomènes de micro-bullage, sous forme d'un voile uniforme déposé par pulvérisation.

- Fixation convenable de tous les éléments noyés dans le béton (fourneaux, boîte inserts, armatures).
- Limitation de la hauteur de chute libre du béton à 5 m, afin d'éviter toute ségrégation.
- Limitation de la longueur de cheminement horizontal (5 à 10 m, maximum à partir du point de distribution), pour éviter les risques de ségrégation.
- Respect des délais de recouvrement entre couches.
- Contrôle de la vitesse de bétonnage afin de limiter la pression sur les coffrages en les équipant de capteurs pour vérifier la tension des tiges de serrage des banches.
- Vérification que la hauteur et la vitesse de coulage sont compatibles avec les résistances et la stabilité du coffrage.
- Cure soignée (ces bétons étant plus sensibles aux phénomènes de retrait par dessiccation [45]).

1-7 Fabrication de béton auto-plaçant :

Les formulations de BAP et sa fabrication nécessitent la mise en œuvre, de procédure, et de contrôles adaptés. La plupart des malaxeurs peuvent fabriquer de BAP, le temps de malaxage est toutefois légèrement supérieur à celui d'un béton classique, il faut que le mélange riche en éléments fins et en adjuvants, soit le plus homogène possible.

Certaines formules peuvent nécessiter des séquences de malaxage spécifiques (ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur, temporisation, temps de malaxage adaptés).

L'un des points les plus importants de la fabrication est le contrôle strict de la teneur en eau du mélange, par conséquent, il est important de contrôler celle des granulats.

La fabrication de BAP nécessite un contrôle renforcé des constituants afin de garantir la régularité des performances. L'hyper-fluidité du béton conduit à prendre des dispositions spécifiques pour éviter des déversements et à adapter l'ouvrabilité au temps de transport et de mise en œuvre [46].

1-8 Contrôle du BAP :

Pour le contrôle du BAP, trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler sa rhéologie.

- ✓ La mesure d'étalement au cône d'Abrams.
- ✓ L'essai de la boîte en L, écoulement en milieu confiné.

- ✓ L'essai de stabilité au tamis.

1-9 Domaines d'application :

- ✓ Les BAP sont utilisables pour la réalisation d'ouvrages horizontaux et verticaux sur tous les types de chantiers.
- ✓ Adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate.
- ✓ Où il y'a densité de ferrailage importantes, formes et géométries complexes, voiles courbes, voiles minces et de grandes ouvertures, voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures, exigences architecturales et de qualité de certains parements.
- ✓ Accès difficile voire impossibles pour assurer la vibration [47].

Les BAP sont au service de l'esthétisme, ils offrent aux architectes de nouvelles libertés de construction et possibilité d'expression :

- ✓ Les formes et géométrie complexes deviennent possibles à réaliser.
- ✓ Les exigences d'esthétisme, d'uniformité, des parements et d'homogénéité, des teintes peuvent être satisfaites.

L'optimisation des performances des BAP pour la réalisation des parements nécessite :

- Que l'ouvrage soit conçu une approche globale lors de la conception, l'organisation du chantier et lors de sa réalisation.
- Que l'entrepreneur, le fournisseur de coffrage et le fournisseur de béton organisent ensemble dans un esprit de partenariat, avant le démarrage du chantier, les procédures et les phasages du bétonnage.

I-10 Avantages de BAP :

- ✚ Contrainte de mise en œuvre nettement plus faible que celle vibrée.
- ✚ Facilité de coulage sur longues distance et grandes hauteurs.
- ✚ Meilleure qualité et rendu des parements : résolution de contraintes techniques comme certaines formes des structures, densité du ferrailage, réservations complexes.
- ✚ Amélioration de la productivité et de la réduction des coûts de construction.
- ✚ Augmentation des cadences notamment avec la mise en œuvre du béton à la pompe.

- ✚ Amélioration de la sécurité des ouvriers avec la suppression des postes de travail ‘à risques’ (partie haute des coffrages au moment du bétonnage).
- ✚ Réduction des délais de réalisation des chantiers [47].
- ✚ Réduction des besoins en matériel.
- ✚ Optimisation de la charge d’utilisation de la grue des chantiers.
- ✚ Réduction de l’encombrement sur chantier.

I-11 Inconvénients de BAP :

Le désavantage principal de BAP est qu’il entraîne un accroissement du coût des matières premières, de la fabrication et du contrôle. Sur chantier, il nécessite également des coffrages plus lourds afin de reprendre les pressions exercées.

En effet, les données de la littérature concernant les pressions exercées par le BAP sont parfois contradictoires, mais il est recommandé de retenir de manière conservatrice une pression en pied de coffrage correspondant à la poussée hydrostatique du béton frais.

Cependant, de manière globale, des économies résultantes de la rapidité de mise en place, de la diminution de main d’œuvre, de l’usure moindre des coffrages et de l’amélioration sensible de la qualité finale ont toujours été constatées [2].

La composition de BAP implique un dosage délicat des matières premières, il est donc préférable de faire l’appel à une entreprise spécialisée.

Comme le BAP est plus liquide, sa prise est plus lente, cela peut engendrer des dépenses supplémentaires, notamment dans la construction des coffrages [48].

I-12 Conclusion :

Cette étude a été menée afin de se familiariser avec le Béton Auto-plaçant (BAP), l'objectif étant de faire une étude bibliographique, aussi bien sur ses constituants, ses propriétés à l'état frais et durci, son domaine d'application, son contrôle, sa mise en œuvre et ses avantages ainsi que ses inconvénients.

Le BAP est un béton particulier, fluide, qui se compacte sous l'effet de gravité, il ne nécessite pas lors de sa mise en place de moyens de serrage.

A l'état frais, le BAP est caractérisé par sa fluidité élevée, sa stabilité rhéologique et par son excellente adéquation au bétonnage des éléments complexes.

A l'état durci, le BAP doit garantir une durée de vie prolongée de la structure et des performances mécaniques, donc une résistance élevée et une perméabilité minimale sont exigées pour ses propriétés recherchées, en général, une durabilité élevée.

Chapitre II :
Formulation du BAP

II-1- Définition de la formulation :

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, (l'affaissement au cône d'Abrams). Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, citer comme exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient.

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables / gravillons sur une courbe de référence [48].

Pour le béton auto-plaçant, ses différentes propriétés (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage), rendent sa formulation relativement compliquée.

Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieu confiné, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton auto-plaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précisé [49].

II-2 Objectif de la formulation :

L'étude de formulation du BAP vise à :

- ✓ Déterminer les caractéristiques et propriétés du BAP à l'état frais : fluidité, mobilité, stabilité statique et dynamique.
- ✓ Valider la robustesse de la formule, en particulier vis-à-vis des variations de teneur en eau.
- ✓ Vérifier la conformité des performances du béton durci : résistances mécaniques.
- ✓ Confirmer le maintien de la rhéologie du béton pendant la durée pratique d'utilisation [45].

II-3 Principe de formulation de BAP :

II-3-1 Les facteurs influençant sur la formulation :

Parmi les facteurs influençant sur la formulation du béton auto-plaçant :

- La fluidité : Le BAP doit avoir une grande fluidité, et pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (vibration), à travers des zones confinées (armatures), en présence d'obstacle ou se mettre en place dans des coffrages de grande hauteur.
- La résistance à la ségrégation dynamique (en phase de coulage), et la résistance à la ségrégation statique (une fois en place), afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques.
- La résistance au ressuage ou tassement [50].
- Pompabilité : Le BAP doit assurer de bonnes conditions de pompabilité, étant donné que le pompage apparaît comme le moyen de transport le plus naturel [23].

II-3-2 Les critères de formulation :

Pour ces facteurs, la formulation de BAP repose sur trois critères principaux :

- ✓ Fluidification de la pâte : elle est obtenue sans ajout d'eau par utilisation de super-plastifiant à fort pouvoir dé-floculant.
- ✓ Limitation des frottements entre les granulats : pour favoriser l'écoulement, la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible, le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mis en œuvre par vibration [50].
- ✓ Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation : elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additifs (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumée s de silice) [4].

II-4 Contrainte de formulation :

La formulation du BAP doit tenir en compte :

- ✚ Du type d'application : horizontale, verticale.
- ✚ Des dimensions de la partie d'ouvrage à bétonner : épaisseur de la dalle, hauteurs des voiles.
- ✚ Des techniques de mise en œuvre (benne, pompe.....).

- ✚ Du type de pompage ; par le haut ou injection en pied de coffrage.
- ✚ De la densité d'armatures.
- ✚ Des conditions climatiques.
- ✚ Des rythmes et délais de livraison [45].

II-5 Qualification de formulation :

Il est absolument nécessaire d'appréhender, au stade de l'étude de formulation et des essais de convenance, la sensibilité du BAP aux écarts de composition et principalement aux variations de teneur en eau.

Ce n'est que lorsqu'on aura vérifié que cette sensibilité est compatible avec les méthodes et moyens de fabrication que la formule nominale pourra être validée sur la base des essais sur éprouvettes (résistance mécanique et essais complémentaires éventuels).

Au stade de l'étude, on pourra mesurer la résistance à la ségrégation du béton en fonction du dosage en eau en notant en parallèle les valeurs d'étalement, les densités (mesurées sur béton ni vibré ni piqué) et les résultats à la boîte en L correspondants. Sur cette base, on définit ensuite une plage d'étalement acceptable à la mise en œuvre (FER) et la fourchette de dosage en eau correspondante. Le principe est:

- ✓ La formule dérivée haute doit présenter une stabilité satisfaisante.
- ✓ La formule dérivée basse doit conduire à un résultat à la boîte en L correct et ne doit pas induire une dégradation de la densité par insuffisance du compactage gravitaire.

Il faut également intégrer la vérification du maintien de rhéologie pendant la Durée Pratique d'Utilisation recherchée (la valeur d'étalement doit rester incluse dans la FER jusqu'à T_m).

L'influence de la température sur la rhéologie des BAP peut conduire à adapter les dosages en adjuvants suivant les saisons et ceci pourra être évalué au stade de l'étude.

L'usage montre que beaucoup de formulations de BAP ne tolèrent pas, à l'instar des BHP, les variations d'eau de plus ou moins de 10 l/m³ mentionnées dans le Fascicule 65A du CCTG pour les bétons courants. Les écarts admissibles sont en général de plus ou moins 5 l/m³. Toutefois, des formulations plus robustes peuvent être mises au point et notamment grâce à l'adjonction d'adjuvants tels des agents de cohésion.

A l'occasion des épreuves de convenance, indispensables pour qualifier une formule donnée sur une centrale donnée, il est recommandé de réaliser au moins trois gâchées (sur lesquelles on fait varier la teneur en eau) permettant de préciser la fourchette d'étalement admissible (FEF et FER) à partir de la vérification de la conformité des trois bétons produits [51].

II-6 Particularité de la formulation :

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

II-6-1- Un volume de pâte élevé :

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m³).

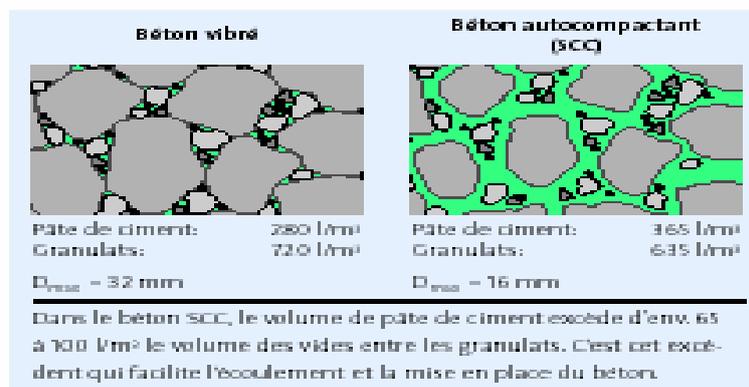


Figure II-1: volume de pâte relatif au BAP est différent de BV [36]

II-6-2- Une quantité de fines (Ø < 80 µm) importante :

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m³) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé). Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les

formulations de BAP) et leur proportion respective.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et auto-plaçant du béton [46].

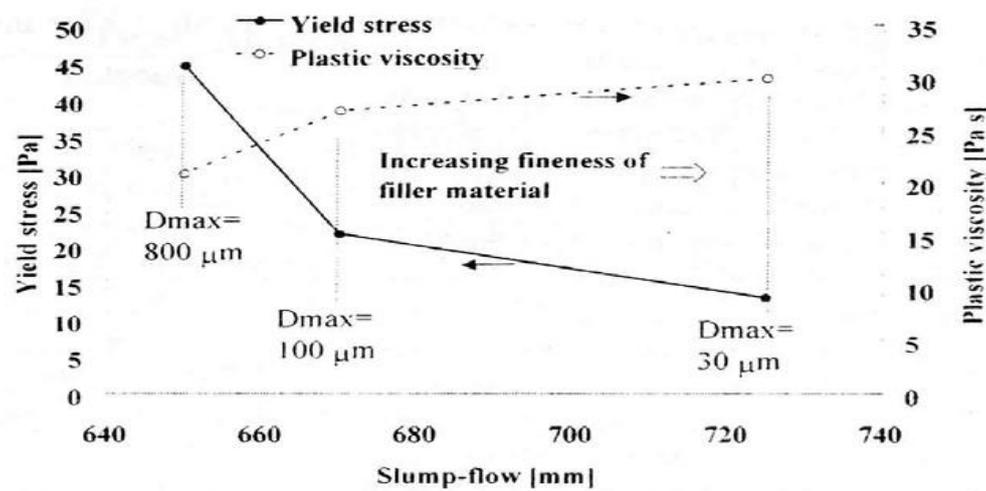


Figure II-2: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [36]

II-6-3- L'emploi de super-plastifiant :

Les super-plastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type poly-carboxylates, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation), sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Les super-plastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [36].

II-6-4- L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau) :

L'ajout d'un super-plastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés celluloses, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et

les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants [36].

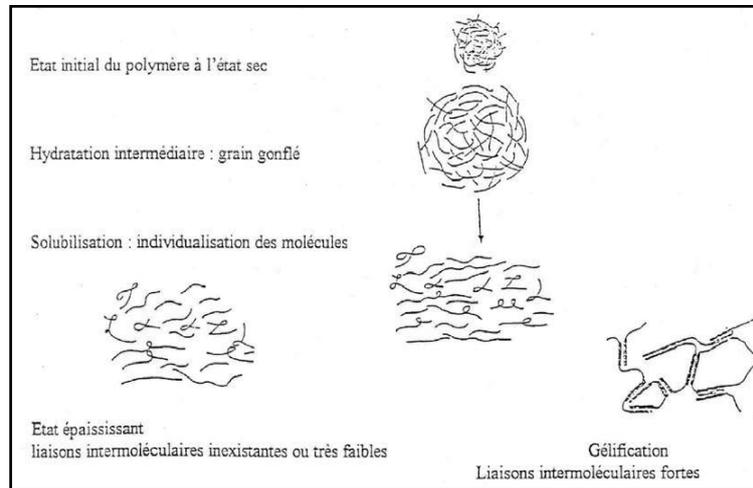


Figure II-3: Interaction entre l'eau et les polysaccharides [36]

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des super-plastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité – super-plastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage.

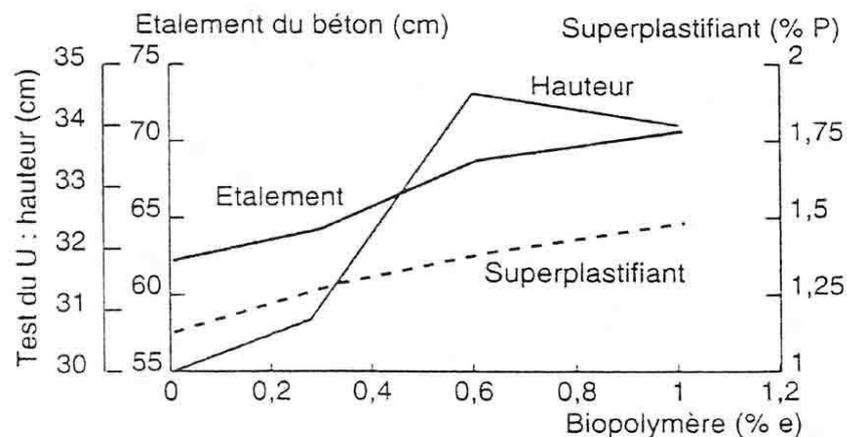


Figure II-4: Optimisation du dosage agent de viscosité – super-plastifiant [36]

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [36].

II-6-5-Un faible volume de gravillon :

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée.

Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour le BAP un rapport G/S de l'ordre 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons D_{\max} dans un BAP est compris entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec D_{\max} , cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

Les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de BV, mais leurs proportions sont différentes.

Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les super-plastifiants), sont nécessaires.

Toute la gamme de résistances de béton conventionnel, peut être obtenue avec le BAP, en jouant sur la nature de liant qui le compose (ciment, additions), et le rapport E/L.

Les résistances au jeune âge peuvent être affectées lorsque les bétons contiennent de grosses proportions d'additions, ou un fort dosage en adjuvant.

Il est possible de produire et de stabiliser suffisamment d'air dans ces bétons avec un agent entraîneur d'air classique, pour les protéger efficacement du gel-dégel. Il semble toutefois indispensable d'introduire l'agent entraîneur d'air, avant la fluidification complète du béton (avant l'ajout de la totalité du super-plastifiant, comme exemple).

En effet l'entraînement et la stabilisation de l'air semblent plus difficiles, voire impossibles, lorsque le béton est très fluide dans le malaxeur.

A partir de ces facteurs, critères, et particularité de formulation, la principale difficulté auquel le formateur est confronté, est de pouvoir concilier des propriétés a priori contradictoires, la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage de béton [36].

Il existe une très grande variété de matériaux dans le monde, et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il

est impossible de réaliser une formulation universelle de béton auto-plaçant, chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux), doit mettre au point sa propre formulation. La variété de matériaux peut conduire aussi à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, résistance) [19].

II-7 Pratique actuelle de la formulation :

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux - Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de BPE, et notamment l'industrie des bâtiments, qui utilisent principalement des bétons de 25 à 35 MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer).

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation, les dosages en super-plastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, à cause de leur coût, avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en super-plastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formateurs ont certes développés leur propre outil. Sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux- Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence

universelle, ce sont plus des supports qui facilitent la formulation [31].

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication, on prend comme exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP.

Il est à noter enfin que les précurseurs et les acteurs de la formulation - sur le terrain - sont les fournisseurs en adjuvants, ce qui est tout à fait cohérent avec le rôle fondamental du super-plastifiant dans le concept du BAP [39].

II-8 Influence de la particularité de formulation sur les propriétés de BAP :

II-8-1 A l'état frais :

a- Quantité de fines :

❖ Fumées de silice :

Les particules des fumées de silice ajoutées dans le béton tendent à remplir les micropores, ce qui permet d'avoir une granulométrie plus étalée et une structure plus dense. L'eau libérée permet de réduire la demande en eau pour une consistance fixe. Cependant, une étude sur le taux de remplacement de ciment par des fumées de silice détermine les proportions suivantes :

Avec des dosages en ciment de 200, 300, 400 Kg/m³, on peut ajouter respectivement jusqu'à 2.4 et 6% de fumée de silice sans augmenter le seuil de rigidité du béton et la viscosité plastique.

Par contre, des dosages plus élevés provoquent une augmentation des frictions entre les fines et rendent le mélange plus collant et cohésif.

L'action de la fumée de silice sur le temps de prise a été étudiée. Cette étude remarque l'augmentation du temps de prise avec la fumée de silice, qui est due à la réduction de l'énergie libérée durant les premières heures qui suivent la confection du béton.

Le dosage en agent entraîneur d'air nécessite pour un volume d'air désiré est plus élevé avec l'incorporation de la fumée de silice, surtout pour les faibles rapports E/L. Ce phénomène est expliqué par la surface élevée des particules, par l'augmentation de la viscosité du béton et aussi par la présence de carbone sur les microsphères de fumée de silice [23].

❖ Cendres volantes :

Par leur finesse, leur forme, leur état de surface et leur faible masse volumique, les cendres volantes améliorent l'ouvrabilité des mortiers et des bétons. Ceci est d'autant plus marqué que les cendres volantes sont plus fines.

Grâce à leur surface lisse, les cendres volantes contribuent à améliorer l'ouvrabilité du béton.

La nature vitreuse des particules empêche l'adsorption d'eau sur leur surface, et ainsi l'eau retenue entre les particules sert à la lubrification.

Le remplacement de 30% du ciment par des cendres volantes dont les particules ont des diamètres maximum de 20, 10 et 5 μm réduit le ressuage du béton. Cette réduction est due à l'obstruction des canaux de l'eau de ressuage par les poudres fines.

Un remplacement de 20 à 30% de cendre modifie de peu de temps de prise à la température ordinaire. Dans le cas d'une teneur élevée, le temps de prise peut être augmenté, de même, la chaleur d'hydratation dégagée lors de la prise diminue régulièrement avec le pourcentage de cendre remplacé [23].

❖ Laitier de haut-fourneau :

Comme tous les ajouts minéraux, l'objectif principale est de remplir les pores afin d'améliorer l'ouvrabilité et la maniabilité par rapport à un béton conventionnel. Ce phénomène a été expliqué par les caractéristiques des surfaces des grains de laitier qui permettent un meilleur glissement inter-granulaire dans la pâte. Aussi le très faible taux d'absorption d'eau par les grains de laitier au début du malaxage.

L'addition de laitier favorise le taux de ressuage du béton, quel que soit le type de laitier. Ceci peut s'expliquer par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise [23].

❖ Filler calcaire :

La rhéologie des pâtes, des mortiers et des bétons dépend de la qualité du filler et de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura e réduction de la qualité d'eau pour une maniabilité fixe, surtout pour des rapports E/C < 0.40.

Aussi la présence dans le filler peut augmenter la demande en eau. Cependant, l'ouvrabilité du béton augmente avec la finesse du filler calcaire jusqu'à 500 m^2/Kg , au-delà de cette limite, il peut y avoir des problèmes de maniabilité.

La présence du filler calcaire peut augmenter le retrait plastique du béton frais et permet de densifier la matrice du mortier.

Le filler calcaire peut également contribuer au contrôle du temps de prise par la formulation de carbone-aluminate de calcium [23].

II-8-2 L'état durci :**a- fumée de silice :**

L'action de fumée de silice sur les propriétés du béton durci se traduit par :

- La résistance à la compression entre 7 et 28 jours avec un pouvoir de 3 à 4 fois supérieur à celui du ciment. On peut avoir une diminution du module d'élasticité pour un rapport E/L donné avec l'utilisation de la fumée de silice. Elle améliore l'adhérence entre le béton et les armatures d'acier par une diminution du ressuage interne au niveau de l'interface de béton-armature. Il y a formation d'une zone de transition dense.
- Une réduction de la perméabilité du béton à l'eau et aux sels, ainsi qu'une augmentation de la résistivité électrique contribuent à réduire le risque de corrosion des armatures d'une part et à neutraliser les réactions alcalis-granulats en augmentant le degré de polymérisation des C-S-H d'autre part.
- Enfin, la fumée de silice a peu d'effet sur les risques de carbonatation, cet effet est également minime dans le cas de la résistance aux cycles gel-dégel avec un rapport E/L de 0,4 [23].

b- Cendres volantes :

Les recherches effectuées sur l'influence des cendres volantes sur les caractéristiques de béton durci ont montré que :

- ✓ Généralement, le développement des résistances mécaniques à jeune âge (3 jours), diminue avec l'utilisation des cendres volantes, surtout celles de classe F, et augmente à long terme.
- ✓ La perméabilité du béton à l'eau et à l'air augmente, surtout si le béton est mûri à l'air à jeune âge. La cendre volante réduit la perméabilité aux ions chlorures.
- ✓ En remplaçant du ciment par la cendre volante, il y a plus de carbonatation du béton à cause de la faible réactivité pouzzolanique des cendres, ce qui retarde le remplissage des pores dans le BO (E/L=0.55).
- ✓ La résistance au gel est légèrement diminuée dans le cas d'une addition de cendres volantes. Cette diminution est assez limitée pour 20% de cendres et opérant à ouvrabilité égale. Celle-ci est due, en partie à l'absorption d'une partie de l'agent entraîneur d'air par les cendres volantes lors de son addition au béton, c'est pourquoi les ciments incorporant des cendres nécessitent généralement une quantité d'adjuvant plus élevée pour obtenir la même teneur en air [23].

c- Laitier de haut-fourneau :

Le béton avec laitier a des résistances moins élevées que le BO durant les premiers jours. Cependant, cette résistance se développe au bout du septième jour à 20 °C.

Les études réalisées sur les mortiers montrent que les mortiers en laitier sont 10 à 100 fois moins perméables à l'eau que les mortiers de ciment portland. De même, le remplacement de 10% du ciment par du laitier permet de réduire l'épaisseur de la zone de transition [23].

d- Filler calcaire :

- ✓ L'action de l'ajout du CaCO_3 accélère l'hydratation du C_3S à jeune âge en servant de sites de nucléation.
- ✓ Le filler calcaire apporte une augmentation des résistances mécaniques à jeune âge.
- ✓ La contribution aux gains de résistances apportée par le filler calcaire est due principalement à la réduction de la demande en eau et à une meilleure utilisation du potentiel hydraulique du clinker. A jeune âge on assiste à une diminution de la porosité initiale.
- ✓ L'addition de filler calcaire augmente la diffusion des ions chlorures.
- ✓ L'addition de filler ne change pas le taux de carbonatation dans le béton.
- ✓ La résistance aux cycles de gel-dégel n'est généralement pas affectée, sauf pour des taux de remplacement supérieures à 15%. Toutefois, les caractéristiques du réseau des bulles d'air restent les principaux facteurs qui déterminent la résistance du béton face aux cycles de gel-dégel [23].

Tous ce qui mentionnés montre l'importance de quantité de fines, pendant la formulation du BAP.

II-9 Les approches de formulation de BAP :

Pour l'instant, il n'existe pas de méthode générale de formulation pour le BAP. Cependant, plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans des pays différents [52].

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques. Ces méthodes sont basées sur des concepts plus ou moins différents et peuvent être présentées en cinq grandes familles d'approches. Toutes les méthodes de formulation des BAP recueillies dans la littérature sont issues d'une ou plusieurs des approches [3].

II-9-1 L'approche basée sur l'optimisation du mortier :

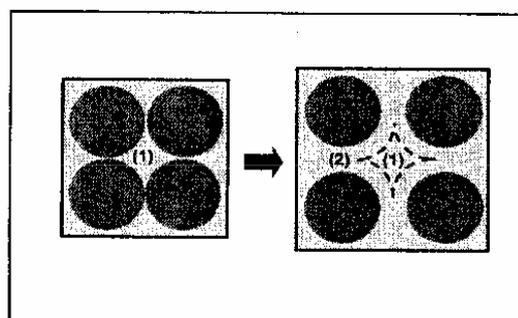
Okamura [3], le concepteur des BAP propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité.

A la suite d'une optimisation identique du mortier, les chercheurs Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg, Jacobs et al [3], montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier [3].

II-9-2 L'approche basée sur l'optimisation de pâte :

Le béton est considéré ici comme un mélange bi-phasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Oh *et al* introduisent la notion d'excès de pâte. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les



problèmes de blocage.

Figure II-5: Notion d'excès de pâte

La pâte remplit la porosité(1) et écarte les granulats(2) [3]

Oh *et al* [3], ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut

d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, Petters-soa [3]. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés, un volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage.

La notion d'excès de pâte a également été proposée par Chanvillard *et al* dans une méthode de formulation des bétons de sable [3].

II-9-3 L'approche basée du squelette granulaire :

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Reprenons la figure II-5, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

Sedran et De Larrard [3], ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet aussi de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, ...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton [3].

L'utilisation de cette méthode nécessite la réalisation de certains essais expérimentaux pour déterminer la compacité du sable, la compacité des gravillons, la demande en eau du ciment avec super-plastifiant, la demande en eau des fillers avec super-plastifiant et le dosage à saturation du super-plastifiant pour le ciment [16].

II-9-4 L'approche basée sur un plan d'expérience :

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. 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 super-plastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC [3].

II-9-5 L'approche basée sur l'utilisation du Mortier de Béton Equivalent :

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

O. HADDAD, S. AGGOUN et al [3], ont mené un travail qui consistait à l'extension de la méthode MBE aux BAP, en étudiant les compositions de 5 bétons et leurs MBE. Les auteurs ont pu confirmer qu'il est possible d'étendre la méthode MBE aux BAP et la composition particulière des BAP ne change pas les principes de calcul des MBE.

L. NACHBAUR et al [3], ont aussi étudié la faisabilité de l'extension de la méthode MBE au BAP. Ils ont pu montrer que la méthode MBE qui était initialement développé pour des bétons d'affaissement inférieur à 21 cm peut être adaptée aux BAP et aussi que les principes de base de la méthode peuvent être gardés [3].

II-10 Les méthodes de formulation de BAP :

Les méthodes de formulation de béton auto-plaçant proposées dans la littérature sont issues d'une ou de plusieurs des approches mentionnées et sont toutes basées sur les constats suivants:

- ❖ Lors de l'écoulement en milieu confiné, ce sont les gros gravillons qui sont les plus sensibles aux phénomènes de blocage. Le formateur devra donc chercher à en diminuer le volume tout en gardant à l'esprit qu'un minimum de gravillons est nécessaire pour minimiser la demande en pâte, à étalement constant.
- ❖ Afin d'obtenir une ouvrabilité suffisante, la pâte doit être suffisamment fluide. Cette fluidité peut être obtenue en jouant sur le rapport eau sur liant ou sur le dosage en super-plastifiant. Une augmentation de la teneur en eau conduit à une chute de la résistance mécanique qui peut être incompatible avec le cahier des charges mais diminue également la viscosité de la pâte. Ceci augmente les risques de ségrégation des gravillons et donc le blocage. Au contraire une variation du dosage en super-plastifiant a peu d'influence sur la viscosité mais un surdosage peut entraîner des problèmes de ressuage.

Le formateur doit donc établir un équilibre entre le rapport entre E/L et le dosage en super-plastifiant pour avoir une pâte fluide mais qui reste suffisamment visqueuse et homogène. Il peut également utiliser un agent de viscosité pour limiter les problèmes de ressuage et de ségrégation [3].

II-10-1 La méthode Japonaise :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants:

a-Dosage des gravillons :

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de

granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m^3 . Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

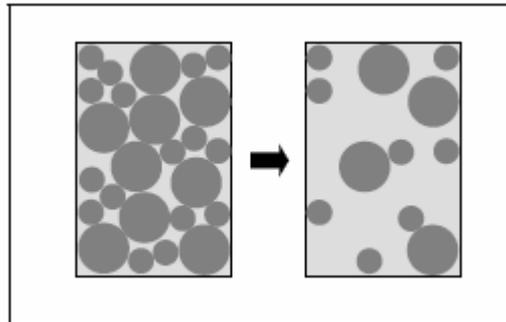


Figure II-6 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa capacité [39]

b-Dosage du sable :

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

c-Dosage du liant :

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

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

d-Dosage de l'eau et du super plastifiant :

Les dosages en eau et en super-plastifiant, sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir [53].

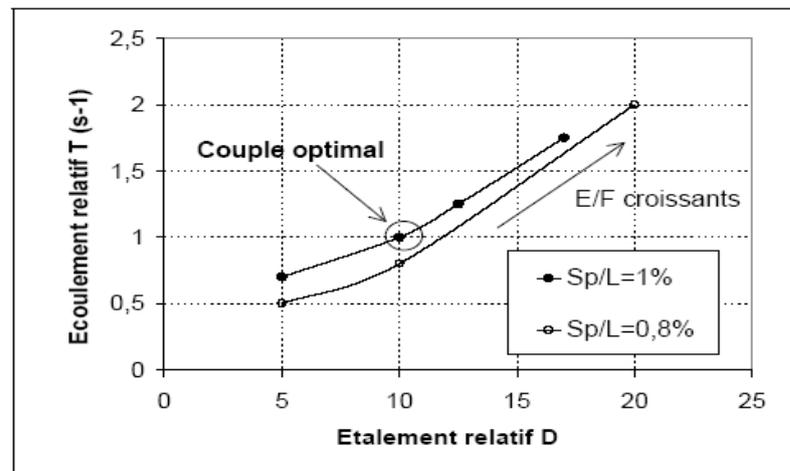


Figure II-7 : Recherche du dosage en eau et en super-plastifiant [36]

II-10-2 La méthode française (LCPC) :

T.SEDRAN et F.LARRARD [54], ont réussi à mettre au point un modèle mathématique développé d'un modèle de suspension solide, il est basé sur les interactions granulaires entre les différents composants du mélange. Ce modèle peut prévoir la compacité d'un mélange granulaire sec avec une précision qui est inférieure à 1% en se basant sur :

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

L'effet de confinement exercé par les armatures et le coffrage sur la compacité du squelette d'un béton, est pris en compte par ce modèle. Le succès de l'utilisation de ce modèle peut prévoir l'évolution de l'ouvrabilité des bétons à hautes performances et des bétons compactés au rouleau en fonction de leur composition.

L'intérêt particulier de ce modèle mathématique est :

- ✚ La compréhension et l'évaluation de l'influence des composants sur les propriétés des bétons ;
- ✚ Le bon choix des matériaux pour les propriétés des bétons frais telles que l'ouvrabilité et la résistance à la ségrégation ou l'état durci à savoir la résistance à la compression, la traction et le retrait.
- ✚ La nature et le caractère spécifique d'un projet sont pris en compte lors de la formulation de béton (béton pompé, coulage en zone d'armatures très denses) [54].

Cette approche adopte la procédure ci-après pour la détermination des divers constituants :

- La proportion du liant est fixée à priori (70 % de liant et 30 % de filler). Les fillers seront choisis selon la disponibilité des matériaux locaux.
- La détermination du dosage de saturation en super-plastifiant.
- Détermination du dosage en eau en présence du super-plastifiant, ce qui indique indirectement la mesure de la compacité, cette dernière permet l'entrée dans le programme du modèle.
- Un logiciel spécial va effectuer les calculs en tenant compte du confinement, la viscosité est fixée arbitrairement à $5 \cdot 10^3$ Pas qui est une valeur correspondant aux BAP selon l'expérience du LCPC.

En conséquence, la quantité d'eau est réduite et la proportion du liant reste constante, tout en optimisant les proportions granulats sur la pâte liante.

- On ajuste le dosage en ajout chimique pour l'obtention de l'étalement ciblé, ce qui donne un béton répondant aux critères rhéologiques [54].

Malgré les programmes de travaux intenses réalisés au LCPC, la nécessité de l'étendue des modèles reliant la composition des mélanges et leur comportement rhéologique est encore exigée.

Par ailleurs, les formulations proposées devront être sujettes à des expérimentations en vraie grandeur pour appréhender les problèmes de ségrégation [3].

II-10-3 La méthode suédoise :

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par, en fait, les chercheurs ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le super-plastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat [53].

II-11 Exemples de formulation de BAP :**II-11-1-- Exemple 1 :****Tableau II-1:** Exemple de formulation de BAP [11]

| Ciment (kg/m ³) | Filler (kg/m ³) | Gravillon (10-14) (kg/m ³) | Gravillon (5-12,5) (kg/m ³) | Sable (kg/m ³) | Eau (Kg/m ³) | SP (kg/m ³) |
|--------------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 451 | 59 | 557 | 299 | 858 | 182 | 6,98 |
| 385 | 120 | 563 | 302 | 867 | 174 | 6,24 |
| 312 | 186 | 566 | 304 | 872 | 169 | 5,38 |
| 480 | 0 | 568 | 305 | 918 | 166 | 7,20 |
| 475 | 0 | 562 | 302 | 909 | 174 | 7,13 |

Commentaire :

Dans ce tableau, il y a 5 formulations du BAP, l'objectif de variation des constituants est d'avoir la plus grande résistance du BAP.

Pour avoir une grande résistance du BAP, il faut :

- ✓ La quantité des fines élevée.
- ✓ Un rapport de G/S entre 0.8 et 0.9.
- ✓ Ajouter un peu d'agent de rhéologie dans la plus part des cas pour améliorer la robustesse.

Dans la formulation 1 :

La quantité des fines (ciment+filler) 510 Kg élevée.

La quantité d'eau 182 L élevée.

Mais le rapport G/S 0.6 et 0.3 < 0.8 ou 0.9

Donc la résistance du BAP1 n'est pas grande avec cette formulation.

II-11-2- Exemple 2 :**Tableau II-2 : Exemple de formulation de BAP [54]**

| 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 | |
| Filler calcaire | 140 | / | / | / |
| Super-plastifiant | 8 | 10 | 16 | 10 |
| Eau totale | 200 | 180 | 169 | 175 |
| f_{c28} (MPa) | 37 | 57.3 | 64.8 | 65 |

Dans ce tableau, il y a une variation des formules du BAP, on remarque que le BAP 2 a une grande résistance à 28 jours par rapport aux autres BAP, malgré l'absence de filler.

II-11-3- Exemple 3 :**Tableau II-3 : Différents BAP avec des différentes formules [54]**

| | BAP 1 | BAP 2 | BAP 3 | BAP 4 | BAP 5 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Ciment (C) | 155 | 331 | 155 | 270 | 350 |
| Eau (E) | 160 | 175 | 159 | 196 | 170 |
| Filler calcaire (F) | / | 216 | / | / | / |
| Sable (S) 0/5 | / | 710 | 760 | / | 828 |
| Gravillon (G) 5/16 | / | 875 | 874 | / | 877 |
| Super-plastifiant (L) | 1.7 | 2.6 | 1.2 | 2.7 | 1.1 |
| Agent de viscosité (L) | 1 | 0.5 | 0.012 | / | / |
| Entraîneur d'air (L) | / | / | / | 0.05 | / |
| Liant (L) | 500 | 547 | 528 | 690 | 440 |
| G/S | / | 1.23 | 1.15 | 1.1 | |
| E/L | 0.32 | 0.32 | 0.30 | 0.41 | 0.39 |
| Étalement au cône d'Abrams (mm) | 680 | 600 | 570 | 700 | 600 |
| Air occlus (%) | 4.2 | 4 | 2 | 5.4 | / |

L'objectif de différentes formulations est d'étudier le comportement du BAP à l'état frais ; on remarque dans l'essai d'étalement, le BAP 4 a une grande valeur 700 mm.

II-11-4- Exemple :

Tableau II-4 : Exemple de formulation Japonaise [19]

| Type de béton | Ciment (kg/m ³) | Laitier (kg/m ³) | Cendres (kg/m ³) | Filler (kg/m ³) | Sable (kg/m ³) | Gravillon (kg/m ³) | Eau (kg/m ³) | Super-plastifiant (kg/m ³) | Agent viscosité (kg/m ³) |
|------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|--|--------------------------------------|
| [Nakataki et al, 1995] | 200 | 200 | 100 | 0 | 704 | 898 | 165 | 6 | 0 |
| [Hayakawa et al, 1995] | 180 | 220 | 100 | 0 | 753 | 926 | 170 | 7,7 | 1,5 |
| [Yurugi et al, 1992] | 300 | 0 | 0 | 200 | 700 | 910 | 170 | 8 | 0,2 |

L'objectif de formulation Japonaise est avoir un intérêt économique, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats.

II-11-5- exemple 5 :

Tableau II-5 : Exemple de formulation canadienne [19]

| Gâchée | Ciment (kg/m ³) | Fumée de silice (kg/m ³) | Gravillons (kg/m ³) | Sable (kg/m ³) | Eau (kg/m ³) | AV (g/m ³) | EA (l/m ³) | SP(l/m ³) |
|----------|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| M35-SF | 563 | 18 | 854 | 709 | 203 | 436 | - | 25,3 |
| M35-A | 581 | - | 835 | 682 | 203 | 436 | 1,0 | 23,2 |
| M35-SF-A | 563 | 18 | 825 | 680 | 203 | 436 | 1,0 | 25,3 |
| M38-A | 589 | - | 875 | 790 | 224 | 436 | 0,8 | 11,8 |
| M38-SF-A | 563 | 18 | 810 | 670 | 220 | 436 | 1,0 | 11,3 |
| M41-SF | 563 | 18 | 809 | 674 | 238 | 436 | - | 7,6 |
| M41-SF-A | 563 | 18 | 775 | 650 | 238 | 436 | 0,8 | 7,6 |

L'objectif de cette formulation est d'étudier le rôle d'addition minérale (fumée de silice), et les adjuvants chimiques (agent de viscosité).

II-12 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a défini la formulation d'un béton en générale et du béton auto-plaçant, dont l'objectif de cette formulation est de:

- Déterminer les caractéristiques et les propriétés d'un BAP à l'état frais : la fluidité, mobilité, stabilité statique et dynamique.
- Vérifier la conformité des performances du béton durci : la résistance mécanique.

On a remarqué qu'il y a des facteurs influençant sur la formulation d'un BAP :

- ✓ Le BAP doit avoir une grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation statique et dynamique, ainsi la résistance au ressuage et la pompabilité.

Toutes ces conditions, influent sur le choix des quantités des constituants du BAP, car chaque constituant joue un rôle très important lors de la formulation et influe sur les propriétés de ce dernier.

Dans ce chapitre, on a remarqué aussi, qu'il y a diverses approches et méthodes permettant de définir la composition d'un BAP.

- ✓ L'approche basée sur l'optimisation du mortier.
- ✓ L'approche basée sur l'optimisation de pâte.
- ✓ L'approche basée du squelette granulaire.
- ✓ L'approche basée sur un plan d'expérience.
- ✓ L'approche basée sur l'utilisation du Mortier du Béton Equivalent (MBE).

Pour l'instant, il n'existe pas de méthodes générales de formulation d'un BAP, car il existe très grande variété de matériaux, et chaque constituant a des influences variées sur les propriétés physico-chimiques du béton.

II-1- Définition de la formulation :

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, (l'affaissement au cône d'Abrams). Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, citer comme exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient.

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables / gravillons sur une courbe de référence [48].

Pour le béton auto-plaçant, ses différentes propriétés (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage), rendent sa formulation relativement compliquée.

Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieu confiné, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton auto-plaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précisé [49].

II-2 Objectif de la formulation :

L'étude de formulation du BAP vise à :

- ✓ Déterminer les caractéristiques et propriétés du BAP à l'état frais : fluidité, mobilité, stabilité statique et dynamique.
- ✓ Valider la robustesse de la formule, en particulier vis-à-vis des variations de teneur en eau.
- ✓ Vérifier la conformité des performances du béton durci : résistances mécaniques.
- ✓ Confirmer le maintien de la rhéologie du béton pendant la durée pratique d'utilisation [45].

II-3 Principe de formulation de BAP :

II-3-1 Les facteurs influençant sur la formulation :

Parmi les facteurs influençant sur la formulation du béton auto-plaçant :

- La fluidité : Le BAP doit avoir une grande fluidité, et pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (vibration), à travers des zones confinées (armatures), en présence d'obstacle ou se mettre en place dans des coffrages de grande hauteur.
- La résistance à la ségrégation dynamique (en phase de coulage), et la résistance à la ségrégation statique (une fois en place), afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques.
- La résistance au ressuage ou tassement [50].
- Pompabilité : Le BAP doit assurer de bonnes conditions de pompabilité, étant donné que le pompage apparaît comme le moyen de transport le plus naturel [23].

II-3-2 Les critères de formulation :

Pour ces facteurs, la formulation de BAP repose sur trois critères principaux :

- ✓ Fluidification de la pâte : elle est obtenue sans ajout d'eau par utilisation de super-plastifiant à fort pouvoir dé-floculant.
- ✓ Limitation des frottements entre les granulats : pour favoriser l'écoulement, la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible, le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mis en œuvre par vibration [50].
- ✓ Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation : elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additifs (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumées de silice) [4].

II-4 Contrainte de formulation :

La formulation du BAP doit tenir en compte :

- ✚ Du type d'application : horizontale, verticale.
- ✚ Des dimensions de la partie d'ouvrage à bétonner : épaisseur de la dalle, hauteurs des voiles.
- ✚ Des techniques de mise en œuvre (benne, pompe.....).

- ✚ Du type de pompage ; par le haut ou injection en pied de coffrage.
- ✚ De la densité d'armatures.
- ✚ Des conditions climatiques.
- ✚ Des rythmes et délais de livraison [45].

II-5 Qualification de formulation :

Il est absolument nécessaire d'appréhender, au stade de l'étude de formulation et des essais de convenance, la sensibilité du BAP aux écarts de composition et principalement aux variations de teneur en eau.

Ce n'est que lorsqu'on aura vérifié que cette sensibilité est compatible avec les méthodes et moyens de fabrication que la formule nominale pourra être validée sur la base des essais sur éprouvettes (résistance mécanique et essais complémentaires éventuels).

Au stade de l'étude, on pourra mesurer la résistance à la ségrégation du béton en fonction du dosage en eau en notant en parallèle les valeurs d'étalement, les densités (mesurées sur béton ni vibré ni piqué) et les résultats à la boîte en L correspondants. Sur cette base, on définit ensuite une plage d'étalement acceptable à la mise en œuvre (FER) et la fourchette de dosage en eau correspondante. Le principe est:

- ✓ La formule dérivée haute doit présenter une stabilité satisfaisante.
- ✓ La formule dérivée basse doit conduire à un résultat à la boîte en L correct et ne doit pas induire une dégradation de la densité par insuffisance du compactage gravitaire.

Il faut également intégrer la vérification du maintien de rhéologie pendant la Durée Pratique d'Utilisation recherchée (la valeur d'étalement doit rester incluse dans la FER jusqu'à T_m).

L'influence de la température sur la rhéologie des BAP peut conduire à adapter les dosages en adjuvants suivant les saisons et ceci pourra être évalué au stade de l'étude.

L'usage montre que beaucoup de formulations de BAP ne tolèrent pas, à l'instar des BHP, les variations d'eau de plus ou moins de 10 l/m³ mentionnées dans le Fascicule 65A du CCTG pour les bétons courants. Les écarts admissibles sont en général de plus ou moins 5 l/m³. Toutefois, des formulations plus robustes peuvent être mises au point et notamment grâce à l'adjonction d'adjuvants tels des agents de cohésion.

A l'occasion des épreuves de convenance, indispensables pour qualifier une formule donnée sur une centrale donnée, il est recommandé de réaliser au moins trois gâchées (sur lesquelles on fait varier la teneur en eau) permettant de préciser la fourchette d'étalement admissible (FEF et FER) à partir de la vérification de la conformité des trois bétons produits [51].

II-6 Particularité de la formulation :

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

II-6-1- Un volume de pâte élevé :

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m³).

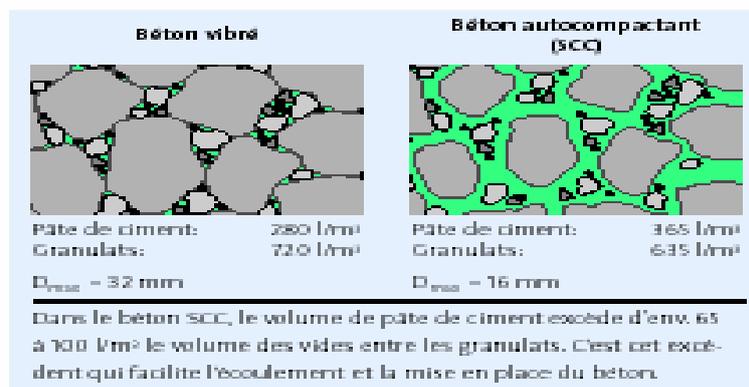


Figure II-1: volume de pâte relatif au BAP est différent de BV [36]

II-6-2- Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante :

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m³) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé). Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les

formulations de BAP) et leur proportion respective.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et auto-plaçant du béton [46].

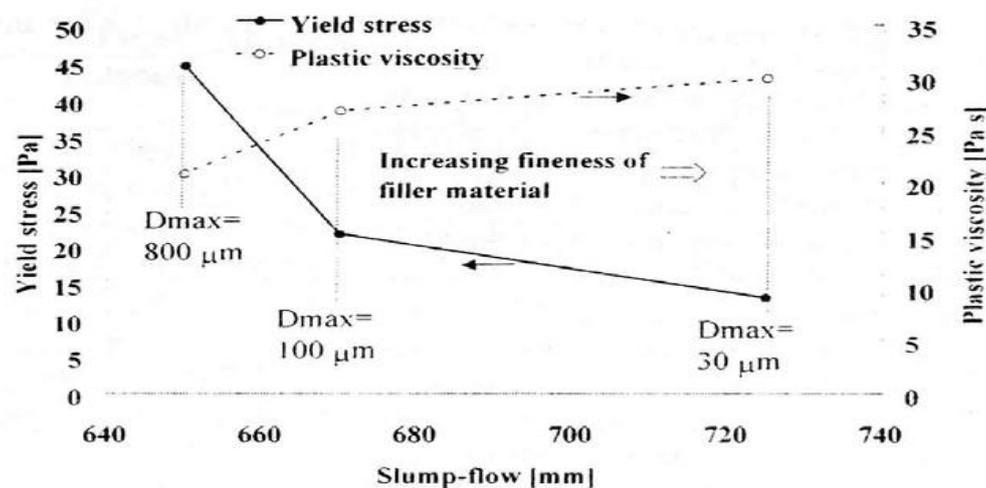


Figure II-2: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [36]

II-6-3- L'emploi de super-plastifiant :

Les super-plastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type poly-carboxylates, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation), sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Les super-plastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [36].

II-6-4- L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau) :

L'ajout d'un super-plastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés celluloses, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et

les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants [36].

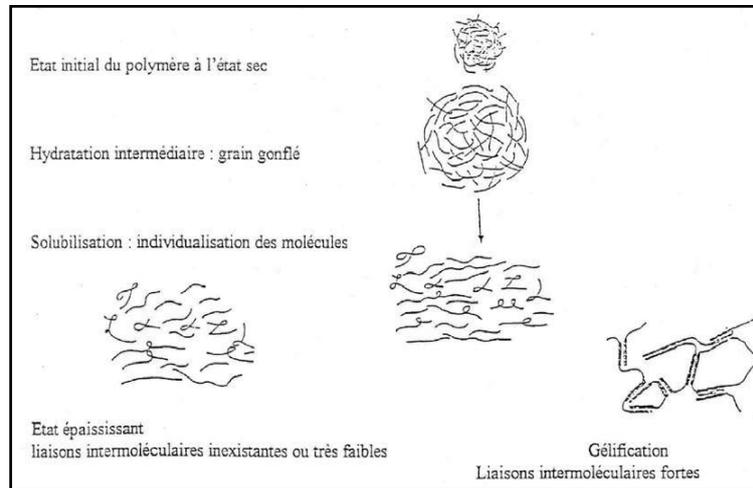


Figure II-3: Interaction entre l'eau et les polysaccharides [36]

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des super-plastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité – super-plastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage.

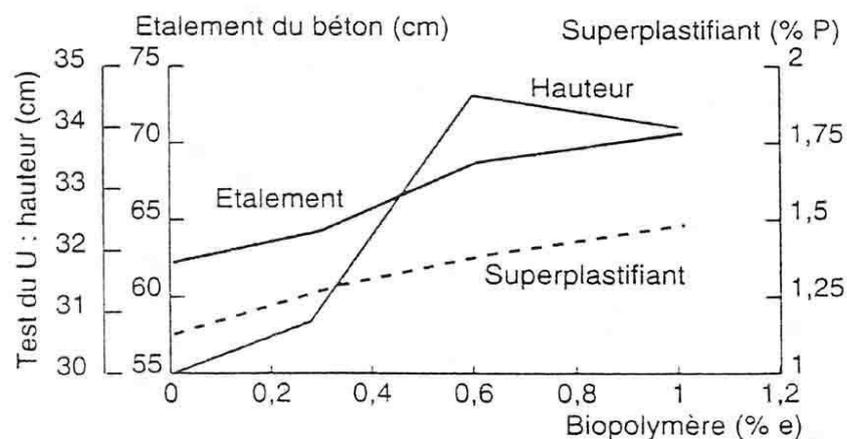


Figure II-4: Optimisation du dosage agent de viscosité – super-plastifiant [36]

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [36].

II-6-5-Un faible volume de gravillon :

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée.

Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour le BAP un rapport G/S de l'ordre 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons D_{\max} dans un BAP est compris entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec D_{\max} , cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

Les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de BV, mais leurs proportions sont différentes.

Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les super-plastifiants), sont nécessaires.

Toute la gamme de résistances de béton conventionnel, peut être obtenue avec le BAP, en jouant sur la nature de liant qui le compose (ciment, additions), et le rapport E/L.

Les résistances au jeune âge peuvent être affectées lorsque les bétons contiennent de grosses proportions d'additions, ou un fort dosage en adjuvant.

Il est possible de produire et de stabiliser suffisamment d'air dans ces bétons avec un agent entraîneur d'air classique, pour les protéger efficacement du gel-dégel. Il semble toutefois indispensable d'introduire l'agent entraîneur d'air, avant la fluidification complète du béton (avant l'ajout de la totalité du super-plastifiant, comme exemple).

En effet l'entraînement et la stabilisation de l'air semblent plus difficiles, voire impossibles, lorsque le béton est très fluide dans le malaxeur.

A partir de ces facteurs, critères, et particularité de formulation, la principale difficulté auquel le formateur est confronté, est de pouvoir concilier des propriétés a priori contradictoires, la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage de béton [36].

Il existe une très grande variété de matériaux dans le monde, et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il

est impossible de réaliser une formulation universelle de béton auto-plaçant, chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux), doit mettre au point sa propre formulation. La variété de matériaux peut conduire aussi à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, résistance) [19].

II-7 Pratique actuelle de la formulation :

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux - Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de BPE, et notamment l'industrie des bâtiments, qui utilisent principalement des bétons de 25 à 35 MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer).

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation, les dosages en super-plastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, à cause de leur coût, avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en super-plastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formateurs ont certes développés leur propre outil. Sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux- Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence

universelle, ce sont plus des supports qui facilitent la formulation [31].

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication, on prend comme exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP.

Il est à noter enfin que les précurseurs et les acteurs de la formulation - sur le terrain - sont les fournisseurs en adjuvants, ce qui est tout à fait cohérent avec le rôle fondamental du super-plastifiant dans le concept du BAP [39].

II-8 Influence de la particularité de formulation sur les propriétés de BAP :

II-8-1 A l'état frais :

a- Quantité de fines :

❖ Fumées de silice :

Les particules des fumées de silice ajoutées dans le béton tendent à remplir les micropores, ce qui permet d'avoir une granulométrie plus étalée et une structure plus dense. L'eau libérée permet de réduire la demande en eau pour une consistance fixe. Cependant, une étude sur le taux de remplacement de ciment par des fumées de silice détermine les proportions suivantes :

Avec des dosages en ciment de 200, 300, 400 Kg/m³, on peut ajouter respectivement jusqu'à 2.4 et 6% de fumée de silice sans augmenter le seuil de rigidité du béton et la viscosité plastique.

Par contre, des dosages plus élevés provoquent une augmentation des frictions entre les fines et rendent le mélange plus collant et cohésif.

L'action de la fumée de silice sur le temps de prise a été étudiée. Cette étude remarque l'augmentation du temps de prise avec la fumée de silice, qui est due à la réduction de l'énergie libérée durant les premières heures qui suivent la confection du béton.

Le dosage en agent entraîneur d'air nécessite pour un volume d'air désiré est plus élevé avec l'incorporation de la fumée de silice, surtout pour les faibles rapports E/L. Ce phénomène est expliqué par la surface élevée des particules, par l'augmentation de la viscosité du béton et aussi par la présence de carbone sur les microsphères de fumée de silice [23].

❖ Cendres volantes :

Par leur finesse, leur forme, leur état de surface et leur faible masse volumique, les cendres volantes améliorent l'ouvrabilité des mortiers et des bétons. Ceci est d'autant plus marqué que les cendres volantes sont plus fines.

Grâce à leur surface lisse, les cendres volantes contribuent à améliorer l'ouvrabilité du béton.

La nature vitreuse des particules empêche l'adsorption d'eau sur leur surface, et ainsi l'eau retenue entre les particules sert à la lubrification.

Le remplacement de 30% du ciment par des cendres volantes dont les particules ont des diamètres maximum de 20, 10 et 5 μm réduit le ressuage du béton. Cette réduction est due à l'obstruction des canaux de l'eau de ressuage par les poudres fines.

Un remplacement de 20 à 30% de cendre modifie de peu de temps de prise à la température ordinaire. Dans le cas d'une teneur élevée, le temps de prise peut être augmenté, de même, la chaleur d'hydratation dégagée lors de la prise diminue régulièrement avec le pourcentage de cendre remplacé [23].

❖ Laitier de haut-fourneau :

Comme tous les ajouts minéraux, l'objectif principale est de remplir les pores afin d'améliorer l'ouvrabilité et la maniabilité par rapport à un béton conventionnel. Ce phénomène a été expliqué par les caractéristiques des surfaces des grains de laitier qui permettent un meilleur glissement inter-granulaire dans la pâte. Aussi le très faible taux d'absorption d'eau par les grains de laitier au début du malaxage.

L'addition de laitier favorise le taux de ressuage du béton, quel que soit le type de laitier. Ceci peut s'expliquer par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise [23].

❖ Filler calcaire :

La rhéologie des pâtes, des mortiers et des bétons dépend de la qualité du filler et de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura e réduction de la qualité d'eau pour une maniabilité fixe, surtout pour des rapports E/C < 0.40.

Aussi la présence dans le filler peut augmenter la demande en eau. Cependant, l'ouvrabilité du béton augmente avec la finesse du filler calcaire jusqu'à 500 m^2/Kg , au-delà de cette limite, il peut y avoir des problèmes de maniabilité.

La présence du filler calcaire peut augmenter le retrait plastique du béton frais et permet de densifier la matrice du mortier.

Le filler calcaire peut également contribuer au contrôle du temps de prise par la formulation de carbone-aluminate de calcium [23].

II-8-2 L'état durci :**a- fumée de silice :**

L'action de fumée de silice sur les propriétés du béton durci se traduit par :

- La résistance à la compression entre 7 et 28 jours avec un pouvoir de 3 à 4 fois supérieur à celui du ciment. On peut avoir une diminution du module d'élasticité pour un rapport E/L donné avec l'utilisation de la fumée de silice. Elle améliore l'adhérence entre le béton et les armatures d'acier par une diminution du ressuage interne au niveau de l'interface de béton-armature. Il y a formation d'une zone de transition dense.
- Une réduction de la perméabilité du béton à l'eau et aux sels, ainsi qu'une augmentation de la résistivité électrique contribuent à réduire le risque de corrosion des armatures d'une part et à neutraliser les réactions alcalis-granulats en augmentant le degré de polymérisation des C-S-H d'autre part.
- Enfin, la fumée de silice a peu d'effet sur les risques de carbonatation, cet effet est également minime dans le cas de la résistance aux cycles gel-dégel avec un rapport E/L de 0,4 [23].

b- Cendres volantes :

Les recherches effectuées sur l'influence des cendres volantes sur les caractéristiques de béton durci ont montré que :

- ✓ Généralement, le développement des résistances mécaniques à jeune âge (3 jours), diminue avec l'utilisation des cendres volantes, surtout celles de classe F, et augmente à long terme.
- ✓ La perméabilité du béton à l'eau et à l'air augmente, surtout si le béton est mûri à l'air à jeune âge. La cendre volante réduit la perméabilité aux ions chlorures.
- ✓ En remplaçant du ciment par la cendre volante, il y a plus de carbonatation du béton à cause de la faible réactivité pouzzolanique des cendres, ce qui retarde le remplissage des pores dans le BO (E/L=0.55).
- ✓ La résistance au gel est légèrement diminuée dans le cas d'une addition de cendres volantes. Cette diminution est assez limitée pour 20% de cendres et opérant à ouvrabilité égale. Celle-ci est due, en partie à l'absorption d'une partie de l'agent entraîneur d'air par les cendres volantes lors de son addition au béton, c'est pourquoi les ciments incorporant des cendres nécessitent généralement une quantité d'adjuvant plus élevée pour obtenir la même teneur en air [23].

c- Laitier de haut-fourneau :

Le béton avec laitier a des résistances moins élevées que le BO durant les premiers jours. Cependant, cette résistance se développe au bout du septième jour à 20 °C.

Les études réalisées sur les mortiers montrent que les mortiers en laitier sont 10 à 100 fois moins perméables à l'eau que les mortiers de ciment portland. De même, le remplacement de 10% du ciment par du laitier permet de réduire l'épaisseur de la zone de transition [23].

d- Filler calcaire :

- ✓ L'action de l'ajout du CaCO_3 accélère l'hydratation du C_3S à jeune âge en servant de sites de nucléation.
- ✓ Le filler calcaire apporte une augmentation des résistances mécaniques à jeune âge.
- ✓ La contribution aux gains de résistances apportée par le filler calcaire est due principalement à la réduction de la demande en eau et à une meilleure utilisation du potentiel hydraulique du clinker. A jeune âge on assiste à une diminution de la porosité initiale.
- ✓ L'addition de filler calcaire augmente la diffusion des ions chlorures.
- ✓ L'addition de filler ne change pas le taux de carbonatation dans le béton.
- ✓ La résistance aux cycles de gel-dégel n'est généralement pas affectée, sauf pour des taux de remplacement supérieures à 15%. Toutefois, les caractéristiques du réseau des bulles d'air restent les principaux facteurs qui déterminent la résistance du béton face aux cycles de gel-dégel [23].

Tous ce qui mentionnés montre l'importance de quantité de fines, pendant la formulation du BAP.

II-9 Les approches de formulation de BAP :

Pour l'instant, il n'existe pas de méthode générale de formulation pour le BAP. Cependant, plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans des pays différents [52].

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques. Ces méthodes sont basées sur des concepts plus ou moins différents et peuvent être présentées en cinq grandes familles d'approches. Toutes les méthodes de formulation des BAP recueillies dans la littérature sont issues d'une ou plusieurs des approches [3].

II-9-1 L'approche basée sur l'optimisation du mortier :

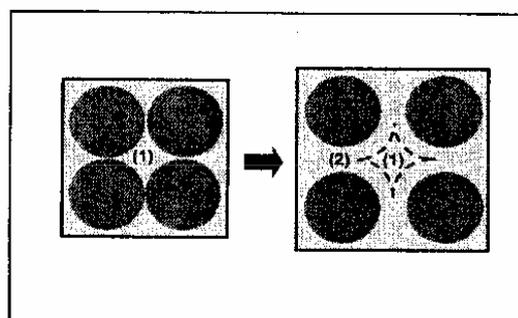
Okamura [3], le concepteur des BAP propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité.

A la suite d'une optimisation identique du mortier, les chercheurs Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg, Jacobs et al [3], montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier [3].

II-9-2 L'approche basée sur l'optimisation de pâte :

Le béton est considéré ici comme un mélange bi-phasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Oh *et al* introduisent la notion d'excès de pâte. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les



problèmes de blocage.

Figure II-5: Notion d'excès de pâte

La pâte remplit la porosité(1) et écarte les granulats(2) [3]

Oh *et al* [3], ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut

d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, Petters-soa [3]. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés, un volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage.

La notion d'excès de pâte a également été proposée par Chanvillard *et al* dans une méthode de formulation des bétons de sable [3].

II-9-3 L'approche basée du squelette granulaire :

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Reprenons la figure II-5, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

Sedran et De Larrard [3], ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet aussi de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, ...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton [3].

L'utilisation de cette méthode nécessite la réalisation de certains essais expérimentaux pour déterminer la compacité du sable, la compacité des gravillons, la demande en eau du ciment avec super-plastifiant, la demande en eau des fillers avec super-plastifiant et le dosage à saturation du super-plastifiant pour le ciment [16].

II-9-4 L'approche basée sur un plan d'expérience :

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. 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 super-plastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC [3].

II-9-5 L'approche basée sur l'utilisation du Mortier de Béton Equivalent :

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

O. HADDAD, S. AGGOUN *et al* [3], ont mené un travail qui consistait à l'extension de la méthode MBE aux BAP, en étudiant les compositions de 5 bétons et leurs MBE. Les auteurs ont pu confirmer qu'il est possible d'étendre la méthode MBE aux BAP et la composition particulière des BAP ne change pas les principes de calcul des MBE.

L. NACHBAUR *et al* [3], ont aussi étudié la faisabilité de l'extension de la méthode MBE au BAP. Ils ont pu montrer que la méthode MBE qui était initialement développé pour des bétons d'affaissement inférieur à 21 cm peut être adaptée aux BAP et aussi que les principes de base de la méthode peuvent être gardés [3].

II-10 Les méthodes de formulation de BAP :

Les méthodes de formulation de béton auto-plaçant proposées dans la littérature sont issues d'une ou de plusieurs des approches mentionnées et sont toutes basées sur les constats suivants:

- ❖ Lors de l'écoulement en milieu confiné, ce sont les gros gravillons qui sont les plus sensibles aux phénomènes de blocage. Le formateur devra donc chercher à en diminuer le volume tout en gardant à l'esprit qu'un minimum de gravillons est nécessaire pour minimiser la demande en pâte, à étalement constant.
- ❖ Afin d'obtenir une ouvrabilité suffisante, la pâte doit être suffisamment fluide. Cette fluidité peut être obtenue en jouant sur le rapport eau sur liant ou sur le dosage en super-plastifiant. Une augmentation de la teneur en eau conduit à une chute de la résistance mécanique qui peut être incompatible avec le cahier des charges mais diminue également la viscosité de la pâte. Ceci augmente les risques de ségrégation des gravillons et donc le blocage. Au contraire une variation du dosage en super-plastifiant a peu d'influence sur la viscosité mais un surdosage peut entraîner des problèmes de ressuage.

Le formateur doit donc établir un équilibre entre le rapport entre E/L et le dosage en super-plastifiant pour avoir une pâte fluide mais qui reste suffisamment visqueuse et homogène. Il peut également utiliser un agent de viscosité pour limiter les problèmes de ressuage et de ségrégation [3].

II-10-1 La méthode Japonaise :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants:

a-Dosage des gravillons :

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de

granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m^3 . Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

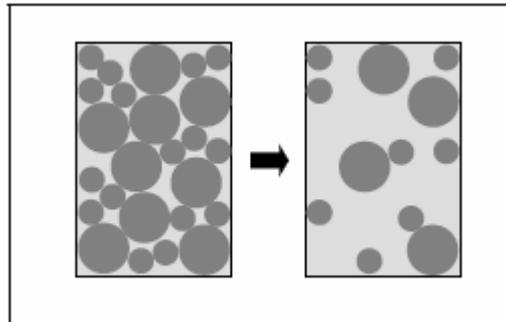


Figure II-6 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité [39]

b-Dosage du sable :

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

c-Dosage du liant :

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

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

d-Dosage de l'eau et du super plastifiant :

Les dosages en eau et en super-plastifiant, sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir [53].

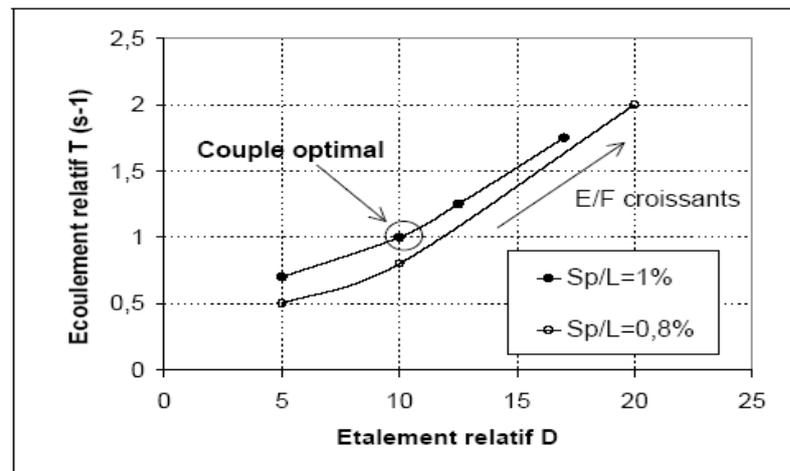


Figure II-7 : Recherche du dosage en eau et en super-plastifiant [36]

II-10-2 La méthode française (LCPC) :

T.SEDRAN et F.LARRARD [54], ont réussi à mettre au point un modèle mathématique développé d'un modèle de suspension solide, il est basé sur les interactions granulaires entre les différents composants du mélange. Ce modèle peut prévoir la compacité d'un mélange granulaire sec avec une précision qui est inférieure à 1% en se basant sur :

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

L'effet de confinement exercé par les armatures et le coffrage sur la compacité du squelette d'un béton, est pris en compte par ce modèle. Le succès de l'utilisation de ce modèle peut prévoir l'évolution de l'ouvrabilité des bétons à hautes performances et des bétons compactés au rouleau en fonction de leur composition.

L'intérêt particulier de ce modèle mathématique est :

- ✚ La compréhension et l'évaluation de l'influence des composants sur les propriétés des bétons ;
- ✚ Le bon choix des matériaux pour les propriétés des bétons frais telles que l'ouvrabilité et la résistance à la ségrégation ou l'état durci à savoir la résistance à la compression, la traction et le retrait.
- ✚ La nature et le caractère spécifique d'un projet sont pris en compte lors de la formulation de béton (béton pompé, coulage en zone d'armatures très denses) [54].

Cette approche adopte la procédure ci-après pour la détermination des divers constituants :

- La proportion du liant est fixée à priori (70 % de liant et 30 % de filler). Les fillers seront choisis selon la disponibilité des matériaux locaux.
- La détermination du dosage de saturation en super-plastifiant.
- Détermination du dosage en eau en présence du super-plastifiant, ce qui indique indirectement la mesure de la compacité, cette dernière permet l'entrée dans le programme du modèle.
- Un logiciel spécial va effectuer les calculs en tenant compte du confinement, la viscosité est fixée arbitrairement à $5 \cdot 10^3$ Pas qui est une valeur correspondant aux BAP selon l'expérience du LCPC.

En conséquence, la quantité d'eau est réduite et la proportion du liant reste constante, tout en optimisant les proportions granulats sur la pâte liante.

- On ajuste le dosage en ajout chimique pour l'obtention de l'étalement ciblé, ce qui donne un béton répondant aux critères rhéologiques [54].

Malgré les programmes de travaux intenses réalisés au LCPC, la nécessité de l'étendue des modèles reliant la composition des mélanges et leur comportement rhéologique est encore exigée.

Par ailleurs, les formulations proposées devront être sujettes à des expérimentations en vraie grandeur pour appréhender les problèmes de ségrégation [3].

II-10-3 La méthode suédoise :

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par, en fait, les chercheurs ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le super-plastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat [53].

II-11 Exemples de formulation de BAP :**II-11-1-- Exemple 1 :****Tableau II-1:** Exemple de formulation de BAP [11]

| Ciment (kg/m ³) | Filler (kg/m ³) | Gravillon (10-14) (kg/m ³) | Gravillon (5-12,5) (kg/m ³) | Sable (kg/m ³) | Eau (Kg/m ³) | SP (kg/m ³) |
|--------------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 451 | 59 | 557 | 299 | 858 | 182 | 6,98 |
| 385 | 120 | 563 | 302 | 867 | 174 | 6,24 |
| 312 | 186 | 566 | 304 | 872 | 169 | 5,38 |
| 480 | 0 | 568 | 305 | 918 | 166 | 7,20 |
| 475 | 0 | 562 | 302 | 909 | 174 | 7,13 |

Commentaire :

Dans ce tableau, il y a 5 formulations du BAP, l'objectif de variation des constituants est d'avoir la plus grande résistance du BAP.

Pour avoir une grande résistance du BAP, il faut :

- ✓ La quantité des fines élevées.
- ✓ Un rapport de G/S entre 0.8 et 0.9.
- ✓ Ajouter un peu d'agent de rhéologie dans la plus part des cas pour améliorer la robustesse.

Dans la formulation 1 :

La quantité des fines (ciment+filler) 510 Kg élevée.

La quantité d'eau 182 L élevée.

Mais le rapport G/S 0.6 et 0.3 < 0.8 ou 0.9

Donc la résistance du BAP1 n'est pas grande avec cette formulation.

II-11-2- Exemple 2 :**Tableau II-2 : Exemple de formulation de BAP [54]**

| 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 | |
| Filler calcaire | 140 | / | / | / |
| Super-plastifiant | 8 | 10 | 16 | 10 |
| Eau totale | 200 | 180 | 169 | 175 |
| f_{c28} (MPa) | 37 | 57.3 | 64.8 | 65 |

Dans ce tableau, il y a une variation des formules du BAP, on remarque que le BAP 2 a une grande résistance à 28 jours par rapport aux autres BAP, malgré l'absence de filler.

II-11-3- Exemple 3 :**Tableau II-3 : Différents BAP avec des différentes formules [54]**

| | BAP 1 | BAP 2 | BAP 3 | BAP 4 | BAP 5 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Ciment (C) | 155 | 331 | 155 | 270 | 350 |
| Eau (E) | 160 | 175 | 159 | 196 | 170 |
| Filler calcaire (F) | / | 216 | / | / | / |
| Sable (S) 0/5 | / | 710 | 760 | / | 828 |
| Gravillon (G) 5/16 | / | 875 | 874 | / | 877 |
| Super-plastifiant (L) | 1.7 | 2.6 | 1.2 | 2.7 | 1.1 |
| Agent de viscosité (L) | 1 | 0.5 | 0.012 | / | / |
| Entraîneur d'air (L) | / | / | / | 0.05 | / |
| Liant (L) | 500 | 547 | 528 | 690 | 440 |
| G/S | / | 1.23 | 1.15 | 1.1 | |
| E/L | 0.32 | 0.32 | 0.30 | 0.41 | 0.39 |
| Étalement au cône d'Abrams (mm) | 680 | 600 | 570 | 700 | 600 |
| Air occlus (%) | 4.2 | 4 | 2 | 5.4 | / |

L'objectif de différentes formulations est d'étudier le comportement du BAP à l'état frais ; on remarque dans l'essai d'étalement, le BAP 4 a une grande valeur 700 mm.

II-11-4- Exemple :

Tableau II-4 : Exemple de formulation Japonaise [19]

| Type de béton | Ciment (kg/m ³) | Laitier (kg/m ³) | Cendres (kg/m ³) | Filler (kg/m ³) | Sable (kg/m ³) | Gravillon (kg/m ³) | Eau (kg/m ³) | Super-plastifiant (kg/m ³) | Agent viscosité (kg/m ³) |
|------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|--|--------------------------------------|
| [Nakataki et al, 1995] | 200 | 200 | 100 | 0 | 704 | 898 | 165 | 6 | 0 |
| [Hayakawa et al, 1995] | 180 | 220 | 100 | 0 | 753 | 926 | 170 | 7,7 | 1,5 |
| [Yurugi et al, 1992] | 300 | 0 | 0 | 200 | 700 | 910 | 170 | 8 | 0,2 |

L'objectif de formulation Japonaise est avoir un intérêt économique, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats.

II-11-5- exemple 5 :

Tableau II-5 : Exemple de formulation canadienne [19]

| Gâchée | Ciment (kg/m ³) | Fumée de silice (kg/m ³) | Gravillons (kg/m ³) | Sable (kg/m ³) | Eau (kg/m ³) | AV (g/m ³) | EA (l/m ³) | SP(l/m ³) |
|----------|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| M35-SF | 563 | 18 | 854 | 709 | 203 | 436 | - | 25,3 |
| M35-A | 581 | - | 835 | 682 | 203 | 436 | 1,0 | 23,2 |
| M35-SF-A | 563 | 18 | 825 | 680 | 203 | 436 | 1,0 | 25,3 |
| M38-A | 589 | - | 875 | 790 | 224 | 436 | 0,8 | 11,8 |
| M38-SF-A | 563 | 18 | 810 | 670 | 220 | 436 | 1,0 | 11,3 |
| M41-SF | 563 | 18 | 809 | 674 | 238 | 436 | - | 7,6 |
| M41-SF-A | 563 | 18 | 775 | 650 | 238 | 436 | 0,8 | 7,6 |

L'objectif de cette formulation est d'étudier le rôle d'addition minérale (fumée de silice), et les adjuvants chimiques (agent de viscosité).

II-12 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a défini la formulation d'un béton en générale et du béton auto-plaçant, dont l'objectif de cette formulation est de:

- Déterminer les caractéristiques et les propriétés d'un BAP à l'état frais : la fluidité, mobilité, stabilité statique et dynamique.
- Vérifier la conformité des performances du béton durci : la résistance mécanique.

On a remarqué qu'il y a des facteurs influençant sur la formulation d'un BAP :

- ✓ Le BAP doit avoir une grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation statique et dynamique, ainsi la résistance au ressuage et la pompabilité.

Toutes ces conditions, influent sur le choix des quantités des constituants du BAP, car chaque constituant joue un rôle très important lors de la formulation et influe sur les propriétés de ce dernier.

Dans ce chapitre, on a remarqué aussi, qu'il y a diverses approches et méthodes permettant de définir la composition d'un BAP.

- ✓ L'approche basée sur l'optimisation du mortier.
- ✓ L'approche basée sur l'optimisation de pâte.
- ✓ L'approche basée du squelette granulaire.
- ✓ L'approche basée sur un plan d'expérience.
- ✓ L'approche basée sur l'utilisation du Mortier du Béton Equivalent (MBE).

Pour l'instant, il n'existe pas de méthodes générales de formulation d'un BAP, car il existe très grande variété de matériaux, et chaque constituant a des influences variées sur les propriétés physico-chimiques du béton.

Chapitre III :
Caractérisation du BAP

III-1 Introduction :

Les essais de caractérisation, ainsi que leurs modes opératoires réalisés à l'état frais, garantissent le caractère auto-plaçant du béton, ils sont pratiquement universels. Un mélange est qualifié d'auto-plaçant, si toutes les conditions de fluidité, de viscosité, de résistance à la ségrégation et de capacité à s'écouler à travers des armatures sont remplies [55]. Ces essais visant à évaluer la capacité de remplissage, ont le principe d'évaluer l'habilité du béton à passer à travers une série de barre d'armature, en mesurant la quantité de béton ayant franchir ces obstacles [2].

III-2 Caractérisation de BAP à l'état frais :

III-2-1 Mobilité en milieu non confiné :

a- Essai d'étalement :

Cet essai permet de caractériser la fluidité du BAP et de donner une indication sur sa mobilité en milieu non confiné. La détermination d'étalement s'effectue en utilisant le cône classique d'Abrams, couramment employé pour mesurer l'affaissement du BO.

Sa valeur correspond au diamètre moyen de la galette de béton obtenue suite au soulèvement du cône après un temps suffisamment long. L'étalement cible se situe entre 600 et 800 mm suivant l'utilisation prévue du béton.

Trois classes d'étalement ont été définies:

- ✓ SF1 pour un étalement compris entre 550 et 650 mm.
- ✓ SF2 pour un étalement compris entre 660 et 750 mm.
- ✓ SF3 pour un étalement compris entre 760 et 800 mm.

Si le BAP de classe d'étalement SF1, il est utilisé pour la réalisation d'étalement non ou très faiblement armés. Celui de classe SF3 est dédié aux ouvrages fortement ferrailés.

La vitesse d'étalement du béton est également souvent prise en compte, car elle donne une indication sur la viscosité du béton.

La mesure généralement est de temps, T_{500} qui désigne le temps écoulé pour obtenir une galette de diamètre 500 mm.

L'essai d'étalement permet d'estimer visuellement le risque de ségrégation statique du béton par effet de gravité, qui se manifeste par l'accumulation des gros grains au centre de la galette et par la formation d'une auréole de laitance à ses extrémités [55].

Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette.

En traçant à la truelle des lignes dans la galette, on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui montre un bon comportement.

Une forme bombée de la galette traduit un effet de voûte, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton.

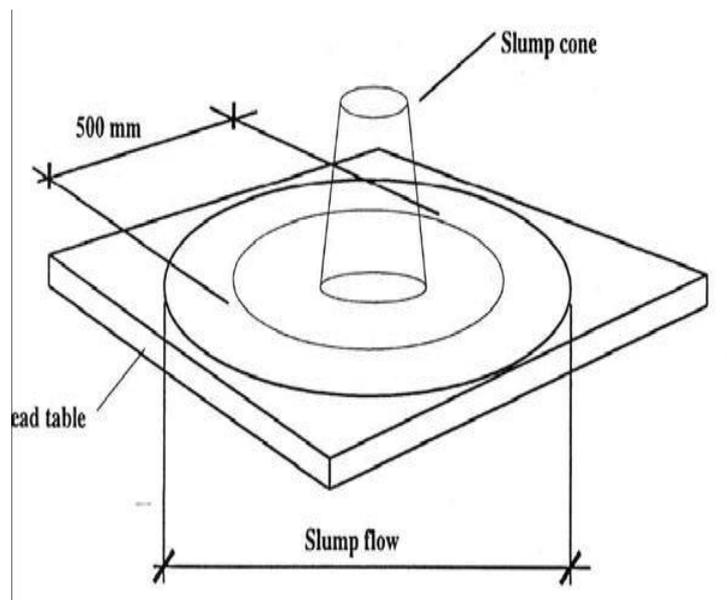


Figure III-1: Mesure d'étalement [36]



Photo III-1: Essai d'étalement [31]

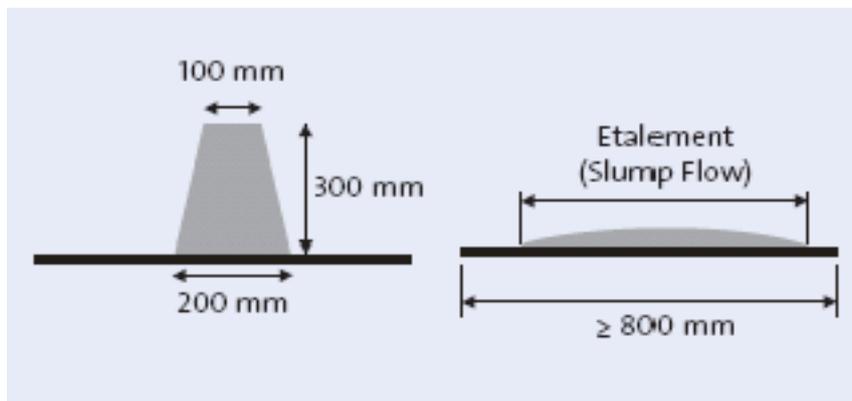


Figure III-2: Essai d'étalement de BO et BAP [36]

III-2-2 Mobilité en milieu confiné :

Lors de leur mise en œuvre, les BAP sont soumis à différentes sollicitations. Dans un premier temps, le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses. Une fois le remplissage effectué, le matériau est soumis à la gravité jusqu'à la prise. Afin de rester homogène tout au long de ces différentes étapes, le matériau doit répondre à ces sollicitations de différentes manières.

S'il y a instabilité, c'est à dire une séparation entre les gros granulats et la phase suspendante lors de la mise en œuvre dans le coffrage, on parle de ségrégation dynamique. La ségrégation statique peut apparaître une fois que le matériau est en place et jusqu'à la prise.

La ségrégation peut être nuisible aux résistances mécaniques mais également à la durabilité de la structure. Or elle n'est pas visible sur les parements sauf si elle s'accompagne de ressuage. Il est donc nécessaire de s'assurer en amont de la stabilité du BAP et de disposer d'essais de vérification avant coulage [31].

a- Essai de la boîte en L :

La cohésion du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée, peuvent se mesurer avec l'essai de la boîte en L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

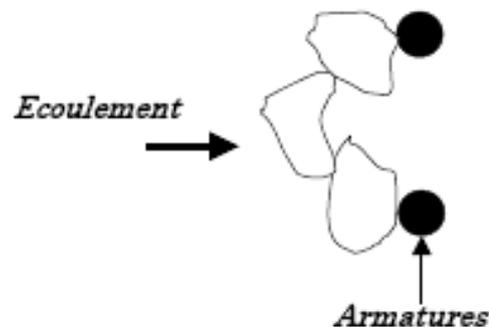


Figure III-3: Risque de blocage au droit des armatures [31]

La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe, à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre de diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure, ferrailage complexe ou simple).

On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale, ce temps d'écoulement doit être compris entre 3 et 7 seconds [48].

Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H_1), et horizontale (H_2).

Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage H_2/H_1 qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné.

Une valeur de ce rapport supérieure à 0.8 traduit un bon écoulement du BAP.

Il est également possible d'exprimer le résultat de l'essai par la seule valeur de H_1 , cette mesure est plus précise que le rapport H_2/H_1 , mais son utilisation est moins répandue [36].

On peut aussi qualifier la capacité d'autonivellement du béton, en mesurant la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale.

L'essai permet de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini [48].

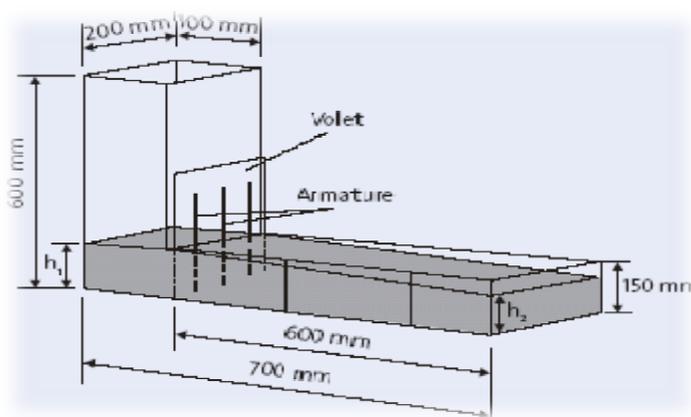


Figure III-4: schéma de la boîte en L [4]



Photo III-2: La boîte en L [4]

b- Essai d'anneau Japonaise :

L'essai d'anneau Japonaise, aussi appelé essai d'étalement modifié, où on utilise le cône d'Abrams renversé.

Cet essai permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages inacceptables. Le cône est placé sur une plaque plane, entouré par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm. Une fois le cône rempli, on soulève ce qui laisse écouler le béton à travers les barres HA. On mesure le diamètre de la galette obtenue.

On peut également déterminer le temps d'écoulement T_{500} qui indique le taux de déformation pour une distance d'écoulement définie et un obstacle donné [36].

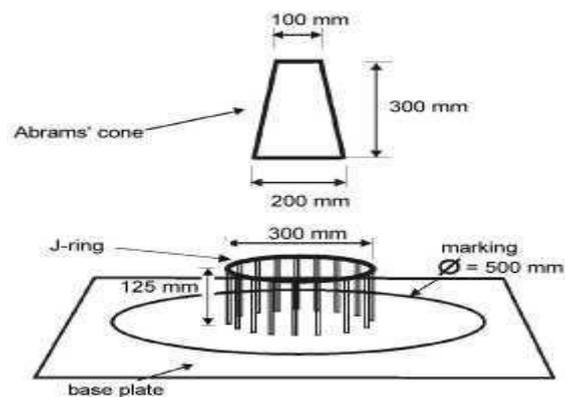


Figure III-5: Schéma d'essai d'anneau Japonaise [36]



PhotoIII-3: Essai d'anneau Japonaise

c- Essai de tube en U :

Le principe est sensiblement le même que pour la boîte en L. Le béton doit s'écouler à travers des armatures et remonter dans la deuxième partie du U de la boîte. Une hauteur de remplissage supérieure à 300 mm est requise. Différentes versions de la forme de la boîte existent : fond arrondi ou fond aplati [31]. L'essai du tube en U, du caisson et de la passoire permettent aussi de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des BAP.

Une boîte transparente en forme de U est séparée en son milieu par des barres d'armature (13 mm de diamètre et espacées de 50 mm centre à centre) et d'une porte coulissante. Après avoir rempli un côté de la boîte avec du béton frais, on applique une masse sur le béton de manière à créer une pression de 2400 Pa. On fait ensuite coulisser la porte pour laisser passer le béton. La hauteur qu'atteindra le béton de l'autre côté des barres d'armatures sera l'indicatif de la capacité de remplissage [36].

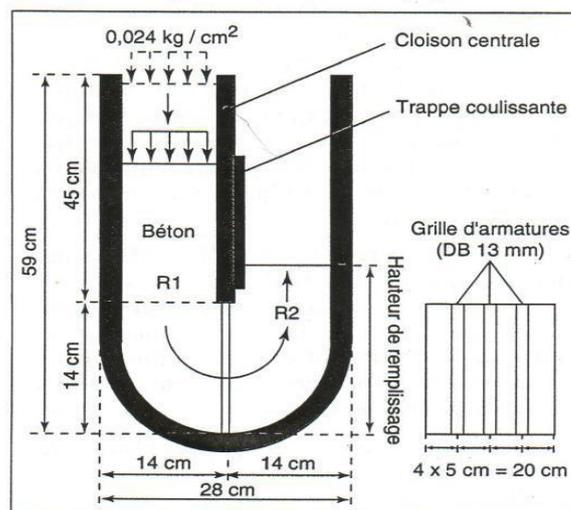


Figure III-6: Schéma de tube en U [4]

d- Essai de l'entonnoir en forme de V (V-funnel) :

L'essai consiste à étudier l'écoulement du BAP à travers un entonnoir en forme de V, il permet d'évaluer la mobilité du béton en milieu confiné, en mesurant le temps d'écoulement de 12 litres de béton à travers l'entonnoir, qui doit être compris entre 8 et 14 secondes. Plus le temps d'écoulement est long, moins le béton est fluide et il est visqueux. D'après les spécifications, deux classes de viscosité ont été définies :

- ✓ VF1 si le temps d'écoulement $t < 8$ s, cette classe correspond à $T_{500} < 2$ s.

✓ VF2 pour un temps d'écoulement $9s < t < 25s$, cette classe correspond à $T_{500} > 2s$ [55].

Le temps d'écoulement dans un V-funnel peut caractériser les trois paramètres rhéologiques d'un béton auto-plaçant. Il peut alors être utilisé seul pour déterminer l'auto-plaçant. Dans le cas d'un blocage causé par une grande quantité de granulats ou de la ségrégation, le V-funnel conduit à des temps d'écoulements relativement plus grand qu'avec un Orimet car l'orifice est de 80mm. C'est pourquoi un Orimet est plus approprié pour la détermination de la capacité de passage et de la ségrégation. Pour cette raison, le V-funnel est une meilleure méthode pour tester la capacité de remplissage [36].

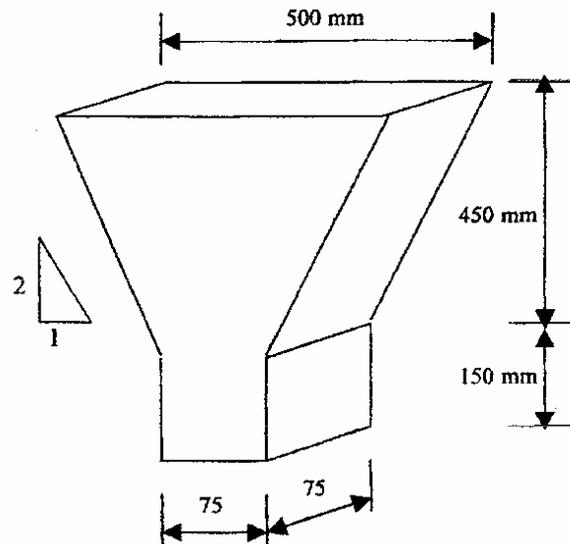


Figure III-7: Schéma de l'essai de V-funnel [3]

III-2-3 Stabilité :

a- Essai de stabilité au tamis :

Cet essai vise à quantifier l'aptitude du BAP à rester homogène après sa mise en place et jusqu'au début de la prise. Le béton doit demeurer stable et il ne doit pas présenter de signes de ségrégation. L'essai consiste à prélever une quantité définie de béton frais (4.8 +/- 0.2 Kg), d'un échantillon de 10 litres mis au repos pendant 15 mn, de la déverser sur un tamis de maille 5 mm avec une hauteur de chute de 50 cm et de peser après 2 mn la laitance qui a traversé le tamis [55].

La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton auto-plaçant de la façon suivante :

- ✓ $0\% \leq \text{Plaitance} \leq 15\%$ → stabilité satisfaisante.
- ✓ $15\% < \text{Plaitance} \leq 30\%$ → stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ).
- ✓ $\text{Plaitance} > 30\%$ → stabilité très mauvaise.

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux [56].



Photo III-4: Essai de stabilité de tamis [4]

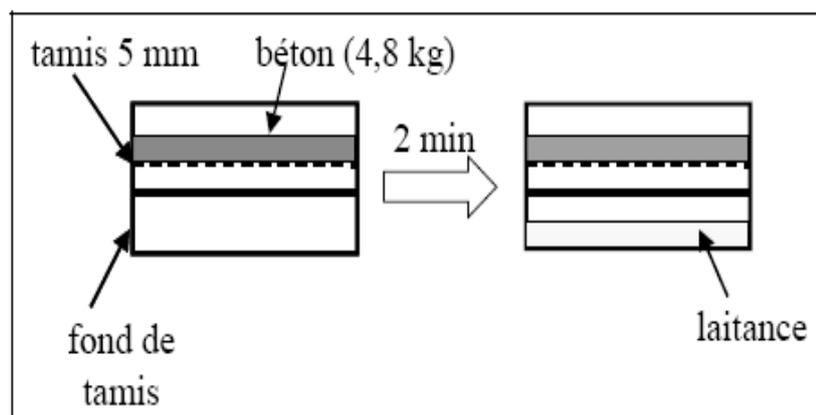


Figure III-8: Schéma de l'essai de stabilité au tamis [31]

b- Essai de capacité au ressuage :

Comme on a dit, que le ressuage est un phénomène d'exsudation de l'eau de gâchage d'un béton avant le début de prise, aussi le ressuage est un type de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables.

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée. Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée[4].

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié, le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59), dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer.

Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé [31].

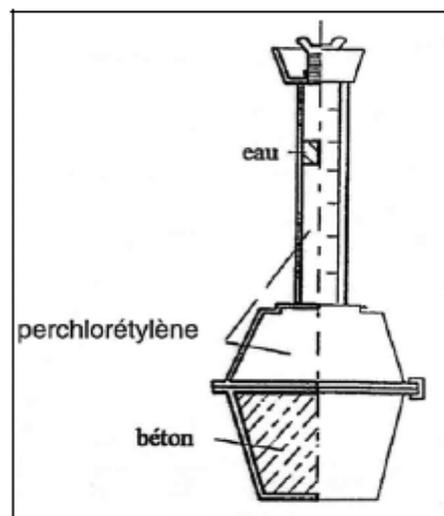


Figure III-9: Essai de ressuage à l'aéromètre [31]

On peut faire d'autres essais sur le BAP frais, on cite comme exemple :

Mesure la teneur en air occlus :

L'air occlus est les vides d'air dans le béton, qui ne sont pas intentionnellement créés. Pour la mesure de l'air occlus dans le béton frais, on utilise la méthode dite 'par pression'. Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre.

Cet aéromètre est constitué d'une cuve recevant l'échantillon de béton et d'un couvercle rigide muni d'un cadran gradué [16].

Le pourcentage de l'air occlus dans les bétons auto-plaçant n'est pas limité à une valeur fixe, mais, plus il augmente plus il influe négativement sur les performances mécanique de béton [4].



Photo III-5: Aéromètre à béton [16]

III-3 Caractérisation de BAP à l'état durci :

A l'état durci les essais mécaniques de caractérisation sont :

- ✓ L'essai de résistance en compression.
- ✓ L'essai de traction par flexion.
- ✓ L'essai de compression sur demi -prismes, 'cube équivalent'.

III-3-1 Essai de résistance en compression :

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 11x22 cm conformément aux prescriptions de la norme.

Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon. La contrainte de compression à la rupture [MPa] est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée [4].



Photo III-6: Essai de compression Laboratoire NHC de l'Est, Belkheir-Guelma -

Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine, la charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

$$F_c = F/A_c \quad \text{Equation III-1.}$$

F_c : La résistance en compression, exprimée en (MPa).

F : La charge maximale, exprimée en (N).

A_c : L'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle, la force en compression est appliquée, exprimée en (mm^2) [18].

III-3-2 L'essai de traction par flexion :

Cet essai est très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages. Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai son propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 4x4x16 cm.

La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante : $\sigma = M_f.a/2*I$, avec le moment de flexion : $M_f = F.L/4$.

F est la charge de rupture.

L la portée.

I l'inertie de flexion, et a le côté du prisme.

Des éprouvettes prismatiques sont soumises jusqu'à rupture à un moment flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs.

La charge maximale atteinte au cours de l'essai est enregistrée, et la résistance en flexion est calculée [18].



Photo III-7: Mesure de la résistance à la traction par flexion

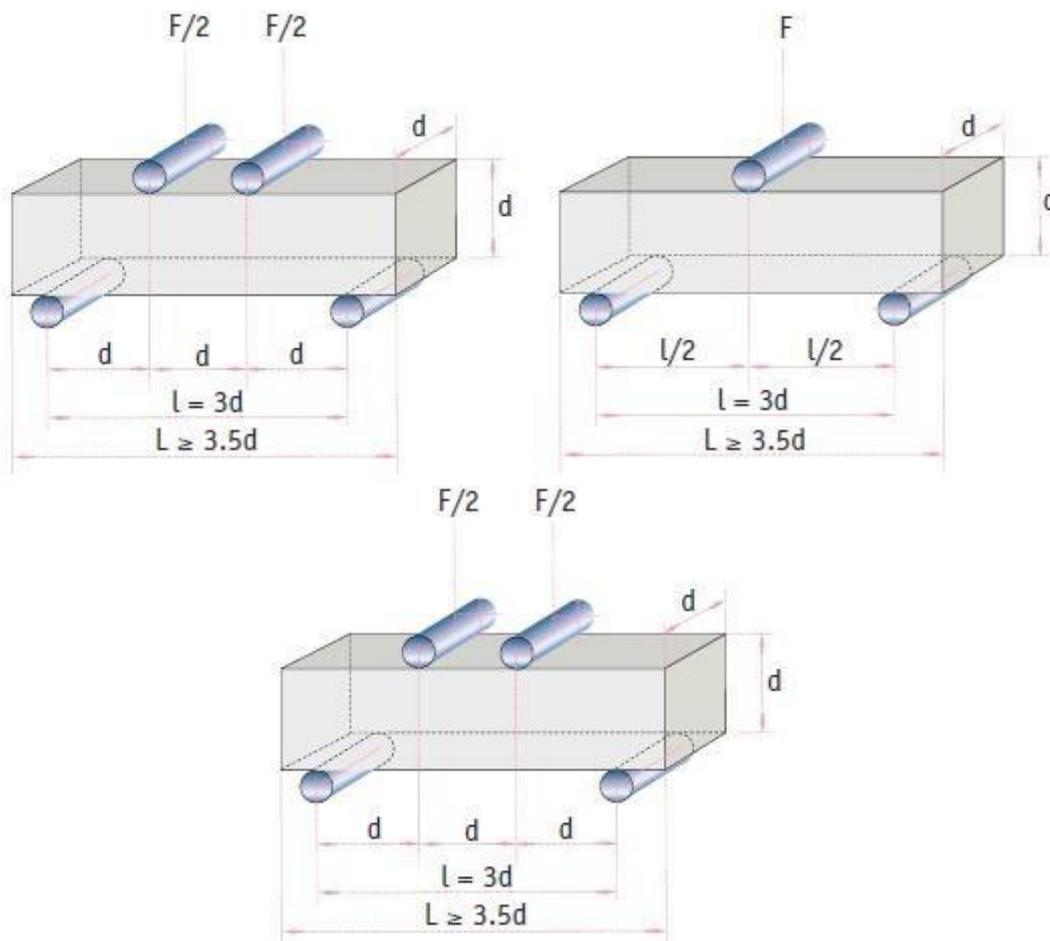


Figure III-10: Disposition de la poutre dans l'appareil d'essai de flexion 3 et 4 points [18]

III-3-3 L'essai de compression sur demi-prismes :

Les demi-prismes issus de la rupture des prismes par flexion sont ensuite testés en compression par écrasement. Ces essais sont principalement conduits à titre comparatif. En effet, les valeurs de résistances à la compression déduites de cet essai sont surestimées, du fait que l'élanement est faible et que les parois latérales sont cisailées.

La contrainte de rupture est obtenue en divisant la charge de rupture par la surface de contact presse / échantillon, soit 4x4 cm.



Photo III-8: Mesure de la résistance à la compression sur demi-prismes [4]

III-4 Exemple de formulation et résultats des essais à l'état frais et durci :

Matériaux utilisés :

Tableau III-1- Caractéristiques des matériaux utilisés [57]

| Matériau | Sable de mer | Sable de carrière (Sc) | Gravier 3/8 | Gravier 8/15 | Gravier 15/20 | Fine (F) | Ciment (C) | Adjuvant | |
|----------|-----------------------|------------------------|-------------|--------------|---------------|----------|-------------------------|-------------|--------------------------|
| | | | | | | | | BV40 | 20HE (Sp) |
| Nature | Siliceux O/D = O/2 | Calcaire O/D = O/4 | Calcaire | Calcaire | Calcaire | Calcaire | CPJ CEMII /A 32,5 | Plastifiant | Viscosant et fluidifiant |

Formulation des bétons étudiés :**Tableau III-2:** Composition des différents bétons [57]

| Compositions (kg/m ³) | Designation des bétons | | | | | |
|--|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | BAP | BAP | BAP | BAP | BAP | BO |
| G/S | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,6 |
| Ciment (Kg/m ³) | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 350 |
| Fillers calcaires (Kg/m ³) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | - |
| Sable de mer (Kg/m ³) | 578 | 578 | 578 | 495 | 495 | 129 |
| Sable de carrière (Kg/m ³) | 333 | 299 | 249 | 299 | 249 | 576 |
| Gravillon 3/8 (Kg/m ³) | 333 | 366 | 333 | 333 | 416 | 204 |
| Gravillon 8/15 (Kg/m ³) | 416 | 416 | 499 | 532 | 499 | 947 |
| Plastiment BV 40 (Kg/m ³) | - | - | - | - | - | 5,2 |
| Viscocrète 20 HE (Kg/m ³) | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | - |
| Eau efficace (Kg/m ³) | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 175 |
| E/C | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

Caractérisation des bétons (Résultats) :**Tableau III-3:** Caractérisation des bétons d'étude (BAP) et (BO) [57]

| BETONS | | ESSAIS | | | | | BO |
|---------------------|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|------|
| | | BAP 1 | BAP 2 | BAP 3 | BAP 4 | BAP 5 | |
| AFFAISSEMENT (cm) | | - | - | - | - | - | 8 |
| ETALEMENT | Dmoy (cm) | 73,0 | 72,0 | 70,0 | 71,0 | 74,5 | - |
| | t 50 (s) | 2,5 | 2,3 | 2,0 | 2,0 | 2,8 | - |
| BOITE EN L | H2/H1 | 0,93 | 0,91 | 0,87 | 0,89 | 0,95 | - |
| | T40 (s) | 3,0 | 3,1 | 3,5 | 3,3 | 3,0 | - |
| STABILITE AU TAMIS | | 11,85 | 12,60 | 7,68 | 8,45 | 13,50 | - |
| RESSUAGE (‰) | | 1,46 | 1,52 | 1,15 | 1,26 | 1,58 | - |
| AIR OCCLUS (%) | | 2,8 | 2,4 | 1,9 | 2,2 | 3,2 | 1,6 |
| Rc à 28 jours (MPa) | | 37,9 | 38,6 | 41,0 | 39,8 | 37,1 | 36,5 |

Commentaires :

L'objectif de différentes formulations de BAP, avec le BO est d'étudier l'influence des paramètres de composition sur le comportement du BAP, à l'état frais et la résistance mécanique à 28 jours.

Pour toutes les compositions de BAP, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente ou très faible (de 1 à 2 mm).

De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes du béton.

Sur la consistance du BO, aucune condition n'avait été fixée au préalable.

Sur la ségrégation dynamique des BAP (boite en L), les résultats obtenus sont conformes aux conditions de BAP, le plus important dans cet essai est que le béton testé à s'écouler à travers les armatures correctement, les BAP présente des taux de remplissage supérieur à 0.80.

Sur la ségrégation statique, tous les BAP ont un taux de ségrégation inférieur à 15 %, c'est-à-dire une stabilité correcte.

Les résistances élevées des BAP, sont liées au volume de pâte important.

L'utilisation du super-plastifiant (Viscocrète 20 HE), dans les formulations peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique.

La présence d'une quantité importante de filler calcaire dans la formule du BAP peut également avoir une action positive sur leurs compacités et alors sur leurs résistances mécaniques.

III-5 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a défini les différents essais de caractérisation du BAP, à l'état frais et durci.

A l'état frais, pour assurer la mobilité (écoulement), en milieu non confiné, on fait l'essai d'étalement, il permet de caractériser la fluidité du BAP, la détermination d'étalement s'effectue en utilisant le cône d'Abrams.

Pour assurer la mobilité du BAP dans un milieu ferraillé (milieu confiné), on fait l'essai de la boîte en L, l'essai d'anneau Japonaise, l'essai de tube en U, l'essai de l'entonnoir en forme de V.

Afin de déterminer la stabilité de BAP, on fait l'essai de stabilité au tamis, et essai de capacité au ressuage.

A l'état durci, on fait l'essai de résistance en compression, l'essai de traction par flexion, l'essai de compression sur demi-prismes.

L'objectif des essais de caractérisation du BAP, est définir les propriétés de ce dernier, et d'étudier le comportement rhéologique et mécanique du ce béton fluide.

Conclusion générale
et
des perspectives

Conclusion générale :

L'objectif de ce mémoire est d'étudier la formulation d'un BAP à base de matériaux locaux.

Une étude bibliographique a été consacrée dans le premier chapitre, afin de se familiariser avec le BAP et ses constituants, les propriétés recherchées à l'état frais et durci, sa mise en œuvre, son domaine d'application, ses avantages et inconvénients.

Le BAP constitue une nouvelle avancée pour la construction en béton, il présente des intérêts techniques et économiques majeurs. Il est capable de se mettre en place sous le seul effet de gravité, sans apport de vibration interne ou externe, dans les coffrages les plus complexes et très encombrés, avec le BAP, il est possible de couler dans des zones d'architecture complexes et difficilement accessible aux ouvriers.

La formulation du BAP a été étudiée dans le deuxième chapitre, et avait comme objectif principal de trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier de charge donné.

On remarque, qu'il existe un nombre important des méthodes permettant de définir la composition d'un BAP, car il existe de très grande variété de matériaux dans le monde, et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton, ceci implique qu'il est impossible de réaliser une formulation universelle de BAP.

A partir des exemples donnés de formulation de BAP, on remarque que chaque constituant et sa quantité utilisée a une influence sur les propriétés du BAP à l'état frais et durci.

Dans le troisième chapitre, on a vu les essais de caractérisation de BAP à l'état frais, en milieu confiné et non confiné, et à l'état durci.

A partir de l'exemple, on peut noter qu'il est possible de fabriquer un BAP à base de matériaux locaux, présents les mêmes composants de base qu'un BO, et permet ainsi d'obtenir les mêmes caractéristiques que celle connues à l'échelle internationale.

Cependant, les exigences que doit satisfaire un BAP par rapport à un BO sont sensiblement plus élevées, en ce qui concerne sa formulation et sa caractérisation à l'état frais.

La formulation du BAP requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, et l'optimisation des paramètres influant en particulier les rapports E/C et F/C.

PERSPECTIVES :

Vu les performances mécaniques et physiques par rapport aux bétons ordinaires les bétons auto-plaçant peuvent, s'imposer progressivement et remplaceront dans les prochaines années pour un grand nombre d'applications les bétons mis en œuvre par vibration.

La formulation et la fabrication des bétons auto-plaçant peut être aujourd'hui de pratique courante en Algérie et ne sera plus du domaine expérimentale vu la disponibilité locale des différents constituants entrant dans leurs compositions.

La banalisation des bétons auto-plaçant à haute résistance peut être rendue possible par la disponibilité du produit au sein du réseau des centrales de Béton Prêt à l'Emploi de manière homogène en Algérie.

Références
Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] BENKHAFA Khaled, comportement du béton auto-plaçant à haute température.
Mémoire Master, Spécialité : Génie civil, Option : Structure
Université 08 Mai 45 –Guelma- Juin 2015
- [2] LABADLIA Khawla, Influence des adjuvants sur la composition des BAP
Mémoire Master, Spécialité : Génie civil, Option : 3C
Université 08 Mai 45 –Guelma- Juin 2015
- [3] BENSEBTI Salah Eddine, Formulation et propriétés des bétons auto-plaçant à base de
Matériaux Locaux
Thèse de Doctorat en science, Spécialité : Matériaux
Université MENTOURI –Constantine- Juillet 2008
- [4] Mohammed RISSEL Khalifa, effet de l'attaque sulfacique externe sur la durabilité des
Bétons Auto-Plaçant.
Thèse en cotutelle internationale, Spécialité: Génie Civil
Université de Constantine Juin 2009
- [5] Stéphane ASSIE, Durabilité des bétons auto-plaçant
Thèse de Doctorat en Génie Civil INSA de TOULOUSE Octobre 2009
- [6] TOUZOUTI Kamila, introduction aux nano-ciments et nano-bétons
Mémoire de Magister, Spécialité : Génie Civil, Option : Structure et Matériaux
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [7] Amouri Chahinez, Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les
propriétés des matrices cimentaires
Thèse de Doctorat en science, Génie Civil, Option : Matériaux
Université de MENTOURI –Constantine- 2009
- [8] LAKHDARI Selma, Effet des adjuvants fluidifiants sur les caractéristiques physico-
mécaniques des mortiers à base des sables des carrières
Mémoire Master, Génie Civil, Option : CCS
Université Mohamed KHIDER –BISKRA- juin 2015

[9] Maher EL BARRAK, contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons auto-plaçant à l'état frais

Thèse de Doctorat, Génie Civil

Université de TOULOUSE

Juillet 2015

[10] Béton Auto-Plaçant, Chapitre2 : revue bibliographique

<http://Thesis-univ-Biskra-dz/1328/5/parielchapitre.pdf>

[11] GERRAIRIA Said, contribution à la formulation des BAP à haute résistance

Mémoire de Magister, Génie Civil, Option : Risques naturels et vulnérabilité des ouvrages

Université de Guelma

Novembre 2010

[12] Le matériau béton, nature physico-chimique et comportement mécanique

Centrale Paris, MSSMAT

[13] ZEROUAL Salah, impact de l'addition de la poussière 'CKD' sur les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers et bétons

Mémoire Master, Spécialité : Chimie des matériaux industriels

Université de Mohamed Boudiaf d'Oran

Novembre 2014

[14] Alfred Roll, Fiche Technique, les adjuvants, chapitre2 : les constituants des bétons et mortiers

SYNAD, Paris

[15] Journée d'information 'ciments-bétons-adjuvants', organisé par ERCE-CTC-Et-granitex

[16] Walid LAIFA, contribution à l'étude des effets du laitier cristallisé et des fibres de diss sur les propriétés des bétons auto-plaçant

Thèse de Doctorat, Option : Matériaux innovants et durabilité

Université de BADJI Mokhtar –Annaba-

2015

[17] Trung Hieu Phan, Comportement thixotropique des pâtes de BAP

Ecole Normale Supérieure de CACHAN

[18] KERROUCHI Fayçel, bases expérimentales pour l'établissement d'une corrélation entre les essais destructifs et non destructifs

Mémoire Master, Génie Civil, Option : VOA

Université Constantine1

2013

- [19] M Phan Trung Hieu, rhéologie et stabilité des pâtes de ciments utilisés dans la formulation des bétons fluides
Thèse de Doctorat, Génie mécanique
Ecole normale supérieure de CACHAN 2007
- [20] Zahia DIDOUCHE, influence des super-plastifiants sur les propriétés de la pâte friche d'un ciment composé
1^{er} Séminaire national de Génie Civil, SOUK-AHRAS 2012
- [21] Comparet C, étude des interactions entre les phases modèles représentatives d'un ciment portland et super-plastifiant
Université Bourgogne
- [22] Brunetand X, Travaux pratiques, ciment et béton
Ecole polytechnique de l'université d'Orléans 2005
- [23] Ahmad MECHAYMECH, optimisation et performance de BAP économiques à base différentes combinaisons d'adjuvants et de liants composés
Mémoire de Maîtrise en science appliquée, Génie Civil
Université de Sherbrooke Canada 2005
- [24] ABIB Z, formulation et caractérisation des bétons auto-plaçant
Thèse de Magister en Génie Civil
Université de ST de Houari BOUMEDIENE 2006
- [25] TAHAR ALI BOUCETTA, contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés de béton auto-plaçant
Thèse de Doctorat, Option : matériaux innovants et durabilité
Université de BADJI Mokhtar 2014
- [26] Additions minérales, <file:///c:/user/acer/picture/additions.pdf>
Laboratoire centrale des ponts et chaussée, centre de Nantes
- [27] Cendres volantes, www.memoireonline.com
- [28] Fumée de silice, www.condensil.com/fre-fr/caracteristiques-techniques
- [29] Cendres volantes, www.doc.lern.fr/l'utilisation-des-cendres-volantes
- [30] Guide d'utilisation des matériaux lorrains en technique, guide de laitier de haut fourneau

www.est.cerema.fr/img/pdf/guidedelaitier-hauts-fourneau-pdf

[31] Chahine BELGHIT, contribution à la formulation d'un béton auto-plaçant à base de matériaux locaux, effet de laitier granulé micromisé sur l'ouvrabilité

Mémoire de Magister, option: Matériaux et structure

Université de BADJI Mokhtar

2009

[32] Filler calcaire, www.cnrs-edu-ib/i&nfo/lsg2010/n01/shahid.pdf

[33] Paco Diederich, contribution à l'étude de l'influence de propriétés des fillers sur le comportement auto-plaçant des bétons

Thèse de Doctorat, Génie Civil

Université de TOULOUSE

2010

[34] Hermann KURT, filler calcaire, les ajouts : les fillers, <file:///C:/users/.....pdf>

[35] Fiche technique, Filltech: technologie des bétons liées à l'utilisation de fillers calcaires.

[36] TABET Nesrine, contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico-chimique de BAPF

Mémoire de Magister, Option : physico-chimie des matériaux minéraux, spécialité : science et génie des matériaux, Université M'hamed BOUGARA Boumerdes

2012

[37] Définition de ségrégation, www.infociments.fr/glossaire/s/segregation

[38] Jean François DEMEYRE, mécanique et dynamique du mélange des poudres

Ecole des mines d'Albi CARMAUX

2004

[39] BENKECHKACHE Ghofrane, étude des comportements différents des BAP

Thèse de Magister, Option : mécanique des structures

Université de MENTOURI –Constantine-

2007

[40] GUELLIL Moustafa Khadri, formulation des bétons auto-plaçant par la méthode de la pâte en excès.

Mémoire de Magister, Génie Civil, Option : Matériau béton

Université ABOUBEKR BELKAID –TELEMCEN-

2012

[41] ZAHOUNI Hassan, élaboration d'un BAP à base de laitier de haut fourneau

Thèse de Magister, Génie Civil, Option : CCI

Université KASDI MERBAH

2011

[42] Hanaa FARES, propriétés mécaniques et physico-chimiques de BAP exposés à une température élevée.

Thèse de Doctorat, Spécialité : Génie Civil

Université de Cergy-Pontoise

2009

[43] www.topie-beton.net/article/beton-auto-plaçant

[44] Béton auto-plaçant, chapitre 5, file:///c:/user/acer/download/CT.T43.pdf

[45] Fiche technique, solution béton, www.infociments.fr

[46] Fiche technique béton auto-plaçant, chapitre 4 : les nouvelles offres du matériau béton

[47] Fiche technique, béton auto-plaçant, Manne béton, www.manne-beton.fr

[48] La boîte en L, GRAMME, unité construction,
www.gramme.be/unite9/pmwikiOLD/pmwiki.php

[49] HOUCINE Oucief, les bétons auto-plaçant à fibrage mixte

Thèse de Doctorat, Option : matériaux et structures

Université de BADJI MOUKHTAR –Annaba-

2006

[50] Des bétons auto-plaçant, info-ciments, www.infociments.fr

[51] AFGC, groupe de travail ‘recommandation pour l’emploi des bétons auto-plaçant, document scientifique et technique

2008

[52] BENAICHA Mouhcine, formulation des différents bétons

Thèse de Doctorat, Génie Civil

Université d’ABDELMALEK ESSAADI

2013

[53] Béton auto-plaçant, chapitre ii : méthodes de formulation, recherche sur internet

[54] HAIFI Mohamed Redah, formulation des bétons auto-plaçant

Mémoire de Magister, Génie Civil, Option : Matériaux

Université MENTOURI –Constantine-

2011

[55] Mohamed A S Mohamed, influence de la valorisation des microfibrilles végétales sur la formulation et la résistance aux cycles de Gel-Dégel de BAP

Thèse de Doctorat, Génie Civil

Université de Cergy-Pontoise

2011

[56] BENKALI Sarah, caractérisation expérimentale des BAP par ajouts des déchets de construction

Mémoire de Magister, Génie Civil, Option : Modélisation et calcul non linéaire

Université MOULOUD Mammeri de TIZI-OUZOU

[57] N BOUHAMOU, influence des paramètres de composition sur le comportement du béton auto-plaçant à l'état frais

Université de ABDELHAMID IBN BADIS