UNIVERSITÉ YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

Faculté de la Technologie

Département de Génie Civil

MÉMOIRE de Fin d'Etudes

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

Thème :

Analyse de l'influence de certains paramètres sur les propriétés d'un béton autoplaçant

Par :

- ✓ *Djermane Nahla Khadidja*
- ✓ *Benterkia Mohamed*

Encadré par :

Dr. Boucherit. Dalila

Promotion Septembre 2020

REMERCIEMENTS :

Nous remercions tout d'abord ALLAH de nous avoir donné la force d'accomplir ce travail qui refléte nos efforts le long des années d'étude.

Nous tenons à exprimer nos gratitudes et vifs remerciements à notre promotrice, Dr BOUCHERIT.DALILA Pour son orientation et ces précieux conseils pendant de la durée de travail sur ce projet.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent également aux membres du jury, qui ont accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

Ma gratitude va à tous les enseignants qui ont participé à ma formation durant l'année théorique.

Nous remercions également tous les enseignants du département génie civil et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'élaboration de ce modeste travail.

Mes vifs remerciements de tout mon cœur à ma famille et en particulier mes parents qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon affection.

De la part de Benterkia un remerciement spécial pour sa femme Fatima et sa sœur Asma.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à tous les étudiants de master 2 Génie civil, notamment les étudiants de la 2éme année master matériaux de construction pour leur esprit de groupe et leur solidarité.

NAHLA. MOHAMED

الملخص:

تم تنفيذ عملنا لدراسة العلاقة بين خصائص الخرسانة ذاتية الدمج في الحالة الجديدة وفي الحالة الصلبة تحت تأثير معايير معينة؛ والتي قدمناها من بعض الأبحاث المتعلقة بالخرسانة ذاتية الدمج.

يقدم هذا العمل الفصل الأول الذي يتكون من الدخل الببليوغرافي؛ أولاً، نقدم مقدمة عامة تعطي فكرة عامة عن الخرسانة المضغوطة ذاتيًا. ثم نحن مهتمون بالمواد المراد استخدامها، ثم سنصف الخصائص الرئيسية للخرسانة ذاتية الدمج، وطرق الاختلاف في صياغة الخرسانة ذاتية الدمج واختبارات التوصيف في الحالة الجديدة وفي الحالة الصلبة، ويكتمل الفصل بواسطة النتائج التي تم الحصول عليها من الأطروحات والأطروحات حول تأثير معاملات التركيب على الخرسانة ذاتية الصب في الحالة الطازجة وفي الحالة الصلبة

Résumé :

Notre travail a été menée pour étudier la relation entre les propriétés des BAP à l'état frai et à l'état durci sous l'effet de certains paramètres ; qui nous avons apporté de quelques recherches concernant le béton autoplaçant

Une partie de ce travail a été présenté par le premier chapitre qui constitue une analyse bibliographique ; En premier lieu on représente une introduction générale qui permet d'avoir une idée générale sur les bétons autoplaçants. Puis on s'intéresse aux matériaux utilisés, Nous décrirons ensuite les propriétés clés du béton autoplaçant, les déffirents méthodes de formulation d'un BAP et les essais de caractérisation à l'état frais et à l'état durci, Le chapitre est complété par les résultats obtenues des déffirents thèses et mémoires sur les effets des paramètres de composition sur le béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci.

Abstract :

Our wok was carried out to study the relationship between the properties of BAPs in the fresh state and in the hardened state under the effect of certain paramètre ; which we have brought from some research concerning self-consolidating concrete

Some of this work has been presented in the first chapter which constitutes a bibliographic analysis ; Firstly, we represent a general introduction which gives a general idea of self-compacting concrete. Then we are interested on the used materials, We will then describe the key properties of self-consolidating concrete, the deffirents methods of formulation of a BAP and the characterization tests in the fresh state and in the hardened state, The chapter is completed by the results obtained from theses and dissertations on the effects of the composition parameters on the self-placing concrete in the fresh state and in the hardened state

***SOMMAIRE* :**

1.INTRODUCTION 9

2. Objectif de travail 9

CHAPITRE 1 : Etude bibliographique 10

I.1. INTRODUCTION 11

I.2. CONSTITUANTS DE BETON AUTOPLAÇANT

I.2.1. Le liant

I.2.1.1. Le ciment 12

I.2.1.2. Les additions minérales

I.2.2. Les granulats 14

I.2.2.1. Le volume de granulats

I.2.2.2. La forme et la taille des granulats

I.2.2.3. La granulométrie des granulats 15

I.2.2.4. Rapport gravillon/sable

I.2.3. L'eau de gâchage

I.2.4. Les adjuvants

I.2.4.1. Les superplastifiants 16

I.2.4.2. Les agents de viscosité (AV) 17

I.3. Formulation des bétons autoplaçant

I.3.1. Formulation OKAMURA « la Méthode Générale » (Japon)

I.3.2. Méthode suédoise 19

I.3.3. Méthode française

I.3.4. Méthode JSCE 20

I.4. Propriétés clés du béton autoplaçant 21

I.4.1. Déformabilité

I.4.2. Capacité de passage 22

I.4.3. Résistance à la ségrégation (stabilité) 23

I.4.4. Les essais de caractérisation

I.4.4.1. Essais d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow)

I.4.4.2. Essais de la couronne J (J-Ring) 24

I.4.4.3. Essais d'entonnoir (V-Funnel) 25

I.4.4.4. Essais de la boite en L (L-BOX)

I.4.4.5. Essais de la boite en U (U-BOX test) 26

I.4.4.6. Essais de stabilité au tamis 27

I.5. Propriétés physico-mécanique des bétons autoplaçant 28

I.5.1. Résistance à la compression

I.5.2. Résistance à la traction

I.5.3. Modules d'élasticité statique et dynamique

I.5.4. Retrait de séchage ou de dessiccation 29

I.6. EFFETS DES PARAMETRES DE COMPOSITION SUR LE BETON AUTOPLACANT A L'ETAT FRAIS ET A L'ETAT DURCI 31

I.6.1. Effet des granulats sur les propriétés des BAP

I.6.1.1. La nomenclature utilisée est la suivante 32

I.6.1.2. Identification et Caractérisation des Constituants

I.6.1.3. Résultats obtenus sur les BAP étudiés à l'état frais

I.6.1.3.1. Essais d'étalement au cône d'Abrams et T50

I.6.1.4. Résultats obtenus sur les BAP étudiés à l'état durci 33

I.2.1.4.1. Résistance à la compression

I.6.1.5. Conclusion 34

I.6.2. Effet des liants sur les propriétés des BAP

I.6.2.1. Effets des additions minérales

I.6.2.2. Caractérisation des matériaux utilisés 35

I.6.2.3. Vérifications des bétons autoplaçants à l'état frais

I.6.2.3.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams

I.6.2.3.1. Mesure du temps T50 36

I.6.2.4. Effet des additions sur les caractéristiques des BAP À l'état durci

I.6.2.4.1. Résistance à la compression

I.6.2.4.2. Module d'élasticité 37

I.6.2.5. Conclusion

I.6.2.6. La notation des pâtes étudiées est donnée comme suit 38

I.6.2.7. Les compositions des différents bétons 39

I.6.2.8. Essais et caractérisation sur béton frais

I.6.2.9. Essais et caractérisation du béton durci

I.6.2.10. Conclusion 40

I.6.3. Effet du superplastifiant sur les propriétés des BAP 41

I.6.3.1. FORMULATION DES PAP

I. 6.3.2. INFLUENCE DE SUPERPLASTIFIANT SUR L'OUVRABILITE

I. 6.3.3. Conclusion 42

CONCLUSION GENERALE 43

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 44

LISTE DES FIGURES :

Figure 1.1 : Action des superplastifiants-défloculation des grains de ciment : (a) état floculé, (b) état défloculé [31]. 16

Figure I.2 : représentation en plan d'un blocage de granulats à travers Deux armatures [38]. 22

Figure I.3 : Mesure du diamètre d'étalement d'un BAP. 23

Figure I.4 : Dimensions du J-Ring et positions pour mesure de différence De hauteurs [43]. 24

Figure I.5 : Description de l'entonnoir V funnel [48] 25

Figure I.6 : La boite en L. [1] 26

Figure I.7 : Schématisation de l'essai du tube en U. 27

Figure I.8 : Essais de stabilité au tamis. [13] 27

Figure 1.9 : Retraits des BAPB1 (E/C=0,50), BAPJ (E/C=0,43) et BO0 (E/C=0,45) (Turcry, 04). 30

Figure 6.1. Résultats d'étalement au cône d'Abrams des différents BAP réalisés. 32

Figure 6.2. Résultats du T50 des différents BAP réalisés. 33

Figure 6.3. Résistance à la compression des BAP de la famille 01. 34

Figure 6.4. L'étalement en fonction du type d'addition. 35

Figure 6.5. Résistance à la compression des différent BAP à chaque température De cure. 36

Figure 6.6. Module d'élasticité à 28jours en fonction de la température de cure. 37

Figure.6.7. Résistance à la compression à 28 jours des différents BAP. 40

Figure 6.8. Zone d'écoulement des pâtes PAP en changeant SP 42
(à droite des courbes c'est la partie écoulement et à gauche C'est la partie blocage)

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 6.1. Différents mélanges de béton autoplaçant utilisées dans ce travail. 31

Tableau 6.2. Caractéristiques des différents types de sables utilisés. 32

Tableau 6.3. Constituants pour 1m3 du (BAP) 39

Tableau 6.4. Formulation du pate PAP 41

INTRODUCTION GENERALE

1. INTRODUCTION :

Les bétons autoplaçants constituent une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures. Ces derniers sont des bétons spéciaux très fluides, homogènes et stables, dont la spécification est de se mettre en place sous l'effet de leur propre poids à l'aide de sa fluidité et homogénéité sans apport de vibration externe ou interne. Les bétons autoplaçants (BAP) possèdent une plage d'utilisation très large, des résistances couvrant la gamme des bétons ordinaires aux bétons à hautes performances, et ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles [1].

Depuis son apparition, l'utilisation du BAP n'a cessé de généraliser, et ce grâce à ses avantages multiples tant au niveau technologique, économique, environnemental qu'humain. Les BAP permettent une mise en place aisée et rapide ; obtention d'un béton d'excellente qualité (forte compacité et parfait enrobage d'acier) ; obtention des parements d'excellente qualité ; amélioration des conditions de travail sur chantier (réduction des nuisances sonores) et la réduction de la pénibilité du travail des ouvriers et des délais des ouvrages. Par ailleurs, l'utilisation de ce type du béton représente une grande opportunité pour l'exploitation des déchets industriels en raison du volume de poudre élevé qui le compose [2].

Par ailleurs, les bétons peuvent être influés à par certains paramètres et conditions ; La connaissance des effets de ces paramètres sur la caractéristique des bétons autoplaçants est nécessaire pour valoriser ou limiter son utilisation.

2. Objectif de travail :

L'objectif de ce travail est d'élaborer les relations existantes entre les propriétés des BAP à l'état frai et a l'état durci sous l'effet de certains paramètres.

Le travail est présenté comme suit :

Le premier chapitre consiste au revenu bibliographique qui regroupe trois parties ; En premier lieu on représente une introduction générale qui permet d'avoir une idée générale sur les bétons autoplaçants. Puis on s'intéresse aux matériaux utiliser, Nous décrirons ensuite les propriétés clés du béton autoplaçant, les déffirents méthodes de formulation d'un BAP et les essais de caractérisation à l'état frais et à l'état durci, Le chapitre est complété par les essais de caractérisation et les quelques propriétés physico-mécaniques des bétons autoplaçants.

CHAPITRE 1
Etude bibliographique

I.1. INTRODUCTION :

En général, un béton fraîchement mis en place est vibré afin d'enlever l'air emprisonné, rendant ainsi le matériau plus compact ; Le compactage est l'une des clés de la production d'un béton de bonne qualité avec une résistance et une durabilité optimales. Toutefois, au Japon au début des années 1980, en raison des volumes croissants d'armatures avec de plus petites sections de béton et une réduction de la main d'œuvre qualifiée, un compactage convenable était difficile à obtenir, conduisant ainsi à une mauvaise qualité du béton. Okamura et Ouchi [3] ont donc proposé un concept de béton indépendant de la nécessité d'utiliser la technique du compactage. Ozawa et al- [4] produisent le premier prototype de béton autoplaçant (BAP) à l'Université de Tokyo au Japon en 1988. Par définition, les BAP sont des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en œuvre sans vibration, la compaction s'effectuant par le seul effet gravitaire [5, 6].

Puisque le compactage est éliminé, la ségrégation interne entre les particules solides et le liquide environnant est évitée ce qui se traduit dans les zones de transition par une réduction de la porosité entre pâte et granulat et l'amélioration de la durabilité [6, 7].

I.2. CONSTITUANTS DE BETON AUTOPLAÇANT :

I.2.1. Le liant :

La poudre est la composante clé du BAP. En plus de sa fonction principale de relier les différents constituants du béton en présence de l'eau, la poudre occupe les vides inter granulaires en rendant le matériau plus dense. L'augmentation de son volume a pour but d'améliorer les propriétés du béton aussi bien à l'état frais (déformabilité, capacité de passage et résistance à la ségrégation), qu'à l'état durci (résistance et durabilité) [2].

La finesse de la poudre joue un rôle important dans l'amélioration des caractéristiques des BAP. L'augmentation de la finesse de la poudre contribue à l'amélioration de la déformabilité, de l'ouvrabilité, de la résistance à la ségrégation et de la compacité du béton [8,9]. Ozawa et al [10] ont rapporté que des BAP contenant des poudres fines (de grande finesse) présentent des grandes résistances à la ségrégation en raison de la grande quantité d'eau retenue par les grains de la poudre fine [8]. Cependant, l'utilisation des poudres contenant beaucoup des particules fines inférieures à 20µm nécessite un dosage en SP élevé pour les disperser [11]. Noumowe et al [12] ont montré que la quantité des particules fines inférieures à 100 µm a un effet significatif sur la capacité de remplissage et la résistance à la ségrégation [2].

I.2.1.1. Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. 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 [13].

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% [13, 14].

Le mélange obtenu, appelé le cru est ensuite calciné dans un four rotatif porté à la température d'environ 1450˚C. Les matériaux s'agglomèrent et fusionnent partiellement pour former des nodules durs et noirs de 5 à30 mm de diamètre : le clinker. Celui-ci est constitué de quatre phases principales :

– le silicate tricalcique ($SiO_2 - 3\ CaO$), noté C3S

– le silicate bicalcique ($SiO_2 - 2\ CaO$), noté C2S

– l'aluminate tricalcique ($Al_2O_3 - 3\ CaO$), noté C3A

– le ferro-aluminate tétracalcique (Al_2O_3 - $Fe_2O_3 - 4\ CaO$), noté C4AF

Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, hémihydrates, anhydrite) et d'additifs [1, 15]

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts [15, 16].

I.2.1.2. Les additions minérales :

Une addition minérale est une poudre d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutée

directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions : les additions inertes et les additions réactives. L'AFGC [5] recommande l'emploi de quantités importantes de fines dans un BAP pour assurer sa stabilité à l'état frais et éliminer les risques de ségrégation. Quand ce volume est occupé intégralement par du ciment Portland, il fournit au matériau durci, un niveau de performance excessif par rapport aux spécifications demandées. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que le dégagement de chaleur engendré par les réactions exothermiques produites lors de l'hydratation du ciment peuvent provoquer des fissurations de l'élément et il est donc naturel de remplacer une partie de ce volume par des additions minérales, qui sont moins réactives que le clinker et d'un coût inférieur sur le plan énergétique et environnemental. [17].

En général, les ajouts minéraux influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci, elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau [1, 7].

Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les ajouts minéraux réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique. [1].

Les ajouts minéraux substituant le ciment peuvent être classés en fines pouzzolaniques telles que la fumée de silice et la pouzzolane et fines inertes telles que le calcaire :

- **Les fines actives à caractère pouzzolaniques ;** Ce sont des particules de faibles diamètres qui ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment, améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de silice, laitier…).
- **Les fines inertes** comme les fillers calcaires ; l'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont également utilisées pour améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons autoplaçant qui nécessitent une forte teneur en fines pour assurer au BAP un compromis entre une bonne fluidité apportée par les fluidifiants et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des fillers. [18].

I.2.2. les granulats :

L'ouvrabilité et la résistance à la ségrégation des BAP sont largement influencées par le volume, la forme, la granulométrie, la taille, l'humidité, le rapport Gravillon/Sable (G/S) et la finesse des granulats.

I.2.2.1. Le volume de granulats :

Le volume de sable est l'un des facteurs clés qui caractérisent les mortiers autoplaçant (MAP). Un volume de sable adéquat doit donner à la fois un mortier très fluide et homogène. Si le volume de sable dépasse certaine limite, le contact entre les particules de sable augmente, ce qui conduit vers la diminution de la déformabilité des MAP [19]. Okamura [19] recommande un volume de sable représentant 40% de celui du mortier.

Okamura et Ouchi [20] ont rapporté que quel que soit la forme de gros granulats, la diminution de la capacité de passage est due à l'augmentation du volume de gros granulats. Yurugi et al [21] ont rapporté que la réduction du volume de gravillons dans les BAP est plus efficace que la diminution du rapport S/M pour augmenter la capacité de passage à travers des milieux confinés. Okamura et Ozawa [22] ont limité le volume de gros granulats à 50% du volume des solides contenus dans le béton. [2].

I.2.2.2. La forme et la taille des granulats :

Dans le but de minimiser l'interaction entre les granulats, l'utilisation de granulats de forme ronde est recommandée. Des granulats naturels sont préférables aux granulats concassés, puisqu'ils assurent une meilleure capacité de passage en produisant de faibles frottements interparticulaires [23]. L'utilisation de granulats concassés nécessite un volume de pâte élevé pour réduire l'interaction entre leurs particules et éviter par conséquent le blocage du béton [8]. Toutefois, le choix de granulats naturels ou concassés dépend de la disponibilité locale de ces granulats.

La proportion des fines dans les sables joue un rôle important dans la rhéologie des BAP par rapport aux bétons vibrés [24]. Une quantité de fines élevée(<125um) est nécessaire pour augmenter la viscosité et par conséquent la résistance à la ségrégation des BAP. Lorsque la taille des gros granulats est grande par rapport aux écartements entre les armatures, le blocage se produit facilement [8]. Un diamètre maximal de gros granulats variant entre 16 à 20 cm a été utilisé avec succès dans plusieurs applications en BAP [2, 25].

I.2.2.3. La granulométrie des granulats :

Des granulats de granularité continue sont appropriés pour la fabrication des BAP, car ils permettent d'obtenir des BAP de meilleures capacités de déformation d'une part [13] et d'utiliser une quantité de pâte moins importante pour remplir les vides inter granulaires d'autre part. [2].

I.2.2.4. Rapport gravillon/sable :

Le rapport G/S est lié à la compacité du squelette granulaire. Pour les BAP, un rapport G/S proche de 1 permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire et de réduire par conséquent la quantité de la pâte liante nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitée [5], Spengler et al. [26] ont pu obtenir un bon BAP quatre fois plus riche en sable qu'en gravier (sable 80% et gravier 20%) avec un rapport E/C égale à 0,5 ; mais cela peut nuire à la résistance par la suite.

I.2.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton. L'eau de gâchage doit être propre, elle ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [13, 27] :

- 2 g/l pour les bétons à hautes résistances
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

- 15 g/l pour les bétons à hautes résistances
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances

I.2.4. Les adjuvants :

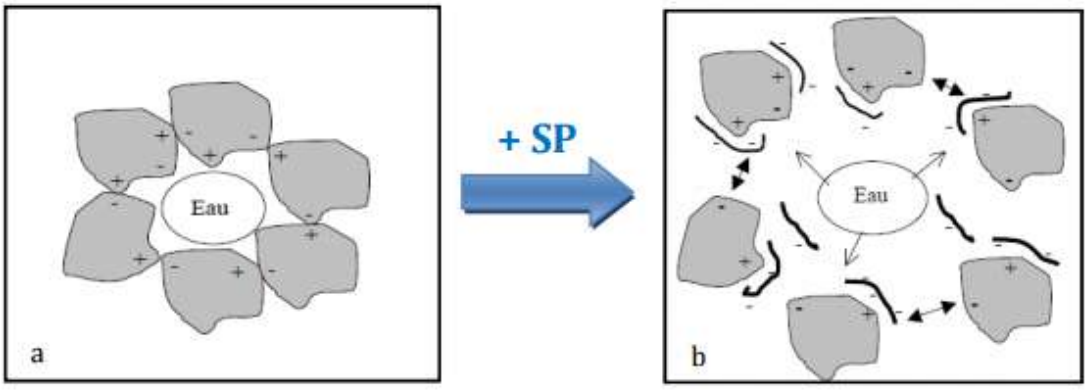
Les adjuvants sont des additions qui sont incorporées durant le malaxage pour améliorer les caractéristiques du béton (fluidité, plasticité, propriétés rhéologiques). Les adjuvants les plus utilisés dans les BAP sont les superplastifiants et les agents de viscosité. [28].

I.2.4.1. Les superplastifiants :

L'apparition des BAP et des bétons à hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP). Les superplastifiants réagissent avec les particules du ciment et les additions minérales. L'action principale des superplastifiants est de défloculé les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaines moléculaires très longues. L'eau piégée par les flocs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure 1.1). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles.

En général, les superplastifiants utilisés dans les formulations des BAP sont du type polymélamine sulfoné, polycarboxylate ou de naphtalène sulfonate.

Sugamata et al [29] (cité dans [30]) ont montrent que l'augmentation du dosage de superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur. Cette valeur est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange. Elhilali [31] a constaté que le dosage en superplastifiant de saturation est beaucoup plus affecté par la finesse des particules des poudres que par leur composition chimique [17].



État floculé État défloculé

Figure I.1 : Action des superplastifiants-défloculation des grains de ciment.
(a) état floculé, (b) état défloculé [31].

I.2.4.2. Les agents de viscosité(AV) :

Généralement les superplastifiants, par leur rôle de fluidifiant diminuent la viscosité du béton frais ce qui le rend moins stable vis-à-vis de la ségrégation, c'est pour cela que les agents de viscosité sont utilisés [13].

L'effet des superplastifiants est double, d'une part il augmente l'ouvrabilité du BAP et il réduit sa viscosité d'autre part. Afin de remédier à ce dernier point, on a souvent recours des agents de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales. Leur rôle est d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse. Leur utilisation est justifiée dans le cas des bétons à fort rapport E/C car les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, dans le cas des BAP à faible rapport E/C, leur utilisation ne semble pas être justifiée [6].

I.3. FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANT :

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage, etc.) rendent leur formulation relativement compliquée et la Réalisation de ce type de béton est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP.

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant :

I.3.1. Formulation OKAMURA « la Méthode Générale » (Japon) [7]

Considérée comme la méthode générale de formulation, la formulation OKAMURA a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura. Cette méthode consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances. Le volume de gravier est fixé à la hauteur de 50% du volume des solides contenus dans le béton. Ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier. L'optimisation des dosages des constituants de la pâte de ciment est donc nécessaire pour s'assurer que le mortier

obtenu (en associant le volume du sable) satisfasse les critères d'ouvrabilité de l'essai d'étalement au cône d'une part, et de l'essai de l'écoulement à l'entonnoir en V d'autre part. [1].

Le principe de cette méthode est le suivant :

– La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide :

$$\mathbf{G = \frac{50}{100} G_{lim}(1 - A)} \quad \text{..... (EqI.1).}$$

Où: A = quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel

$\mathbf{G_{lim}}$ = volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats.

– Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier :

$$\mathbf{S = \frac{40\ (1 - A - G)}{100\ (1 - K_{sf})}} \text{.....(EqI.2)}$$

Où:$\mathbf{K_{sf}}$ = taux de fines particules (<0.09 mm) dans le sable.

– L'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%.

– L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir en V) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône)

– Les auteurs définissent alors deux grandeurs : étalement relatif et vitesse relative d'écoulement. La fluidité du mortier, donnée par :

$$\mathbf{\Gamma_m = \frac{r_1 r_2 - r_0^2}{r_0^2}} \text{..... (EqI.3)}$$

Avec$\mathbf{r_1}$ et r_2 les diamètres d'étalement selon deux médianes.

La viscosité du mortier, donnée par :

$$\mathbf{R_m = \frac{10}{t}} \text{..... (EqI.4)}$$

Avec **t** le temps d'écoulement à l'entonnoir en **V** exprimé en secondes

Ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de $\mathbf{\Gamma_m}$ est élevées, plus le mortier es fluide) et la viscosité (plus la valeur de $\mathbf{R_m}$ est faible, plus la viscosité est élevée) du mortier.

Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément $\boldsymbol{\Gamma_m} = 5$ et $\mathbf{R_m = 1 \pm 0.1}$. Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant satisfaisant [1].

I.3.2. Méthode Suédoise :

En se basant sur les travaux de Tang et Van [32] et Petersson et al [33], l'institut suédois de ciment et de béton (CBI) a proposé une méthode de formulation des BAP. Cette méthode est basée principalement sur le critère de blocage. Son objectif est de produire un BAP économique en cherchant le volume maximal de granulats (volume minimal de pâte) permettant d'éviter le risque de blocage [34]. L'avantage de cette méthode est sa prise en considération des conditions de chantier telles que le diamètre des barres et l'espacement entre les armatures. Dans cette méthode, le critère de blocage est proposé (dépend du type de granulats et de leur taille d'un côté, et de diamètre des barres et de leurs espacements de l'autre coté), et le volume maximal de granulats est calculé [34]. Le rapport gravillons/granulats est choisi de telle manière à avoir le minimum volume des vides dans le squelette granulaire, ce qui nécessite un faible volume de pâte pour les remplir. Le rapport E/C et le type du ciment sont choisis en fonction de la résistance et la durabilité du béton recherchées. Le critère de blocage est ensuite testé au moyen de la boîte en L. pour éviter ce risque, le taux de blocage doit être entre 0,8 et 1 [35]. L'essai d'étalement doit être aussi fait pour tester la déformabilité et l'homogénéité du BAP. Un étalement supérieur à 70 cm est recommandé pourvu que le BAP soit homogène et ne présente aucune tendance de ressuage ou de ségrégation. Cette méthode propose une bonne contribution granulaire, ce qui nécessite un volume de pâte moins important. Néanmoins, la courbe permettant de déterminer le critère de blocage n'est pas général, et il est difficile de la tracer pour chaque type de granulats [2].

I.3.3. Méthode Française :

Cette méthode, qui a été développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) par Sedran et De Larrard [36] : est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité. Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre. Les

auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire. [1]

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (Béton labpro 2) qui est développée par le LCPC en 2008 [36] ; il permet de déterminer des formulations de différents types de bétons, et permettant de simuler la réalisation de gâchées de laboratoire. Le logiciel intègre le modèle d'empilement compressible, lui permettant l'optimisation d'une formulation de BAP suivant un cahier des charges précis comportant les données de compacité des fractions granulaires, les caractéristiques mécaniques des granulats, la demande en superplastifiant, la demande en eau du ciment et de l'addition. Il permet aussi la simulation de quelques propriétés des BAP, notamment, les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique), les résistances mécaniques, ainsi que les déformations différées, etc. [6].

I.3.4. Méthode JSCE :

Cette méthode a été présentée par « Japanese Society of Civil Engineers (JSCE) ». Dans cette formulation, la quantité d'eau, le rapport eau/poudres et la teneur en poudre varient en fonction de l'utilisation ou non d'un agent de cohésion. Les points principaux de cette formulation sont :

- Le diamètre maximal des granulats est limité à 20 mm. Le volume des gros granulats varie de 0,30 à 0,32 L/m3 de béton ; Il peut être plus important pour une faible fluidité.
- En présence d'un agent de viscosité, la quantité d'eau est inférieure à 180 kg/m^3 dans les conditions d'exposition normales. Si la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, cette valeur peut aller jusqu'à 190 kg/m^3 . En l'absence d'un agent de viscosité, la quantité d'eau doit être comprise entre 155 et 175 kg/ m^3 ;
- Le rapport E/P dépend des propriétés du béton dans le cas d'utilisation d'un agent de viscosité, dans le cas contraire, il doit être compris entre 28 et 37 % en masse ;
- La quantité d'air est en fonction de la dimension maximale du granulat, la résistance demandée et des conditions environnementales. La valeur type est de 4,5% d'air ;
- La quantité de sable est obtenue par déduction des quantités de gravier, eau, poudre

- Le dosage de superplastifiant est déterminé à partir des expériences précédentes et fiches techniques des fabricants ; La teneur en agent de viscosité est variée selon le type d'agent. [13].

I.4. PROPRIETES CLES DU BETON AUTOPLAÇANT :

Lespropriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité.Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des testes empiriques : le remlissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellons capacité de passage [5, 37].

I.4.1. Déformabilité :

La déformabilité ou La capacité au remplissage du béton est définie comme l'habilité du béton à entreprendre un changement dans sa forme sous l'effet de son poids propre, même dans le cas de présence d'obstacles qui peuvent interférer avec son écoulement. [1].

Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton [38].

En effet, un bon écoulement du béton se traduit par un faible seuil de cisaillement, et une viscosité suffisante pour assurer le maintien des granulats dans la suspension. Pour garantir ces critères il faut contrôler les facteurs qui influent sur la déformabilité : L'augmentation du volume de pate ou la diminution du volume de granulats favorise l'écoulement [38]. Les essais visant à évaluer le mieux le niveau de déformabilité d'un BAP sont :

- Etalement au Cône d'Abrams (Slump-Flow)
- Temps à T50 au cône d'Abrams (T50 Slump-Flow)
- Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel)
- Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test)
- Etalement au Tube Orimet (Orimet)
- Essai du caisson (Fill Box)

I.4.2. Capacité de passage :

La capacité de passage décrit la capacité du mélange de béton frais à l'étalement à travers des espaces confinés sans ségrégation, sans perte d'uniformisation et sans blocage. [1].
Dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement [5]. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la Figure I.2 ci-dessous qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage. [18].

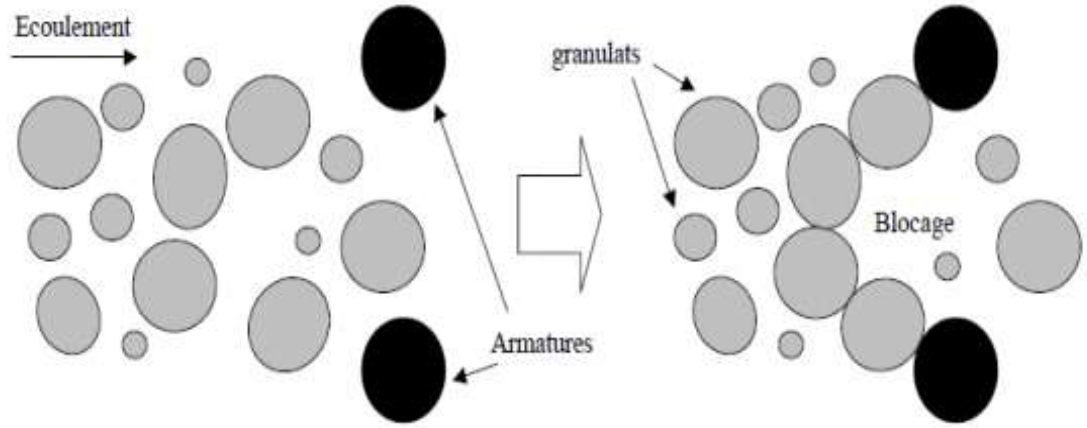


Figure I.2 : représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures [38].

Ainsi, la quantité de granulats est considérée localement plus grande avant les armatures et tend à augmenter avec l'écoulement du béton. Ce phénomène s'explique par le lessivage de la pâte à travers les granulats au niveau du passage entre les armatures [39]. Par conséquent, les frictions et les collisions entre les granulats sont plus importantes, et créent de multiples contacts entre les granulats à l'amont de l'ouverture entre les armatures, ce qui provoque la formation éventuelle d'un arc stable de granulats bloquant l'écoulement du béton. Le béton autoplaçant doit posséder donc une bonne capacité de passage à travers les armatures et dans les confinements. Ceci nécessite une quantité de gravier inférieure à celle d'un béton ordinaire, et de taille maximal plus petite [13].

I.4.3. Résistance à la ségrégation (stabilité) :

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phase solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leur dimension [40, 41].

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une réparation non homogène de l'air occlus.
Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité [18].

I.4.4. Les essais de caractérisation :

I.4.4.1. Essais d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow) :

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton. C'est une variante de l'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtés perpendiculaires (Figure I.3). [17]. Pour obtenir un BAP, des valeurs d'étalement variant entre 65 et 80 cm sont recommandées [35]. Le temps d'écoulement T50, qui présente la vitesse d'écoulement, peut donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange, L'EFNARC [35] recommande des valeurs de T50 bornées par 2 et5s. La stabilité du BAP peut être évaluée visuellement en observant le processus d'écoulement et les bords de la galette après l'arrêt de l'écoulement. La présence d'une couche de laitance ou l'accumulation de gros granulats au centre de la galette est le signe de ségrégation.
A cause de la nature visqueuse du BAP, les lectures des mesures d'étalement doivent se faire après stabilité de la galette, soit environ 60 secondes après soulèvement du cône [13, 42].

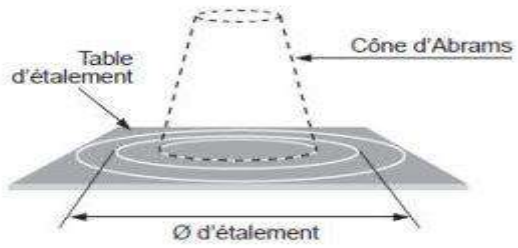


Figure I.3 : Mesure du diamètre d'étalement d'un BAP.

I.4.4.2. Essais de la couronne J (J-Ring) :

L'essai à la couronne J (J-ring test) consiste à investiguer les deux propriétés, la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Il peut aussi être utilisé pour étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. L'essai J-ring mesure trois paramètres : l'étalement, le temps d'écoulement T50J et le blocage.

On l'appelle aussi l'essai d'étalement modifié (J-Ring). Il fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature ϕ16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau [1].

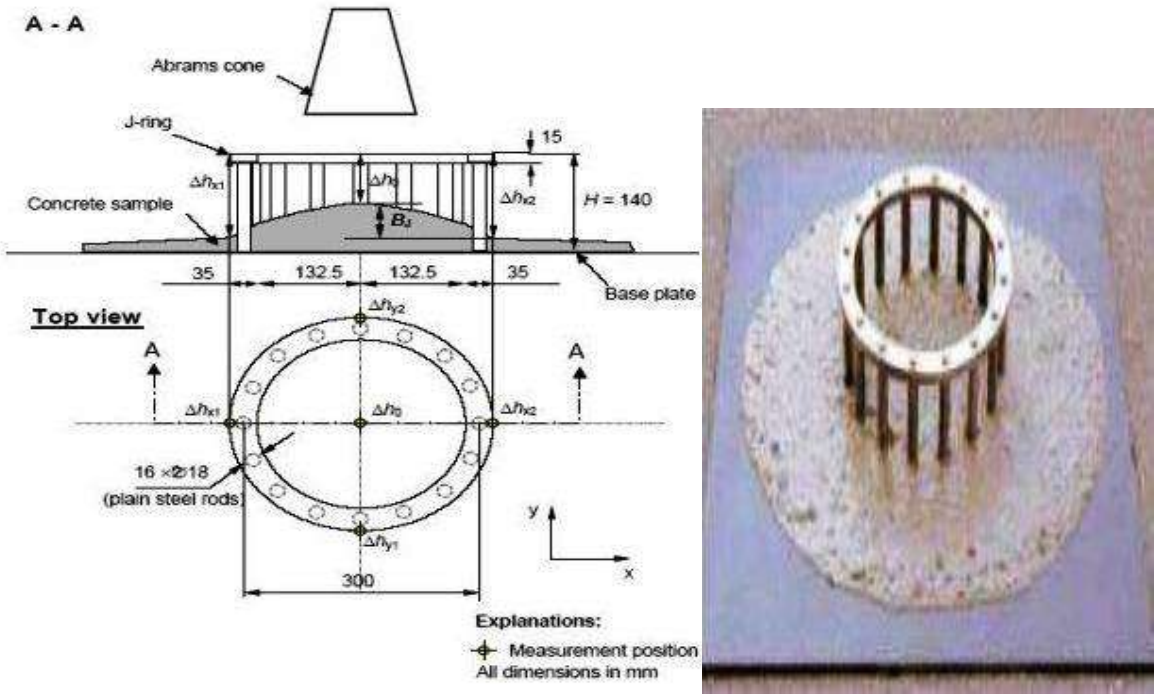


Figure 1.4 : Dimensions du J-Ring et positions pour mesure de différence de hauteurs [43].

I.4.4.3. Essais d'entonnoir (V-Funnel) :

L'essai a été développé au Japon et utilisé par Ozawa et al [44]. L'équipement se compose d'un entonnoir en forme de V, montré dans Figure I.5. L'essai de V-Funnel décrit est utilisé pour déterminer les capacités de remplissage (fluidité) du béton avec une taille maximale des granulats de 20 mm selon la norme NF EN 12350-9 [45]. L'entonnoir est rempli d'environ 12 litres de béton et le temps pris pour qu'il passe à travers l'appareil mesuré. L'essai est relié à la viscosité. Plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante. Le temps d'écoulement augmente quand le rapport addition/ciment diminue au contraire de l'étalement qui diminue avec la diminution de ce rapport [46]. Les temps d'écoulement au V funnel dépendent également du type d'application, l'entonnoir peut être remplis de béton et laissé pendant 5 minutes pour s'arranger. Si le béton montre la ségrégation alors le temps d'écoulement augmentera de manière significative [17, 47].

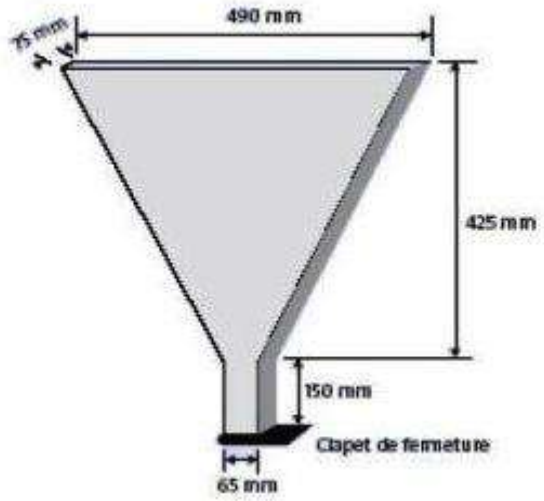


Figure I.5 : Description de l'entonnoir V funnel [48]

I.4.4.4. Essais de la boite en L (L-BOX) :

Cet essai permet d'évaluer la capacité de passage et de remplissage du BAP à travers un grillage d'armatures. Ces propriétés sont évaluées à travers la mesure de la hauteur du béton dans les deux compartiments de la boîte (figure 1.6). Le taux de remplissage (TR), qui est le rapport h2 / h1 (eq1.5), donne une indication sur la capacité de passage et de remplissage du BAP. Skarendhahl [49] a rapporté que, pour les BAP, des valeurs du taux de remplissage qui

varient entre 0,8 et 0,85 sont convenables. L'EFNARC [35] recommande des valeurs bornées par 0,8 et 1.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferraillage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation. [17].

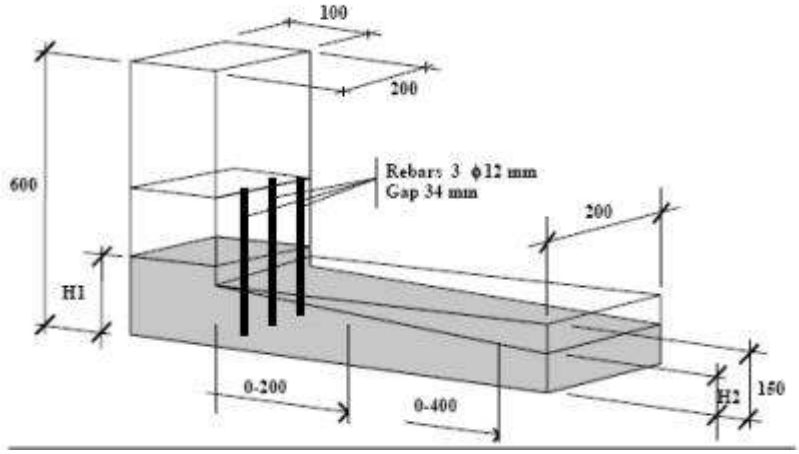


Figure 1.6 : La boite en L. [1]

I.4.4.5. Essais de la boite en U (U-BOX test) :

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boite en L, l'essai du tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton. Le dispositif d'essai (Figure I.7) est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante. Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, et les spécifications des différents pays). Le béton est versé dans la partie R1 de façon continue, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint). La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Si le béton coule aussi librement que l'eau, au repos on aura une surface horizontale ($h_2 - h_1$=0). [1].

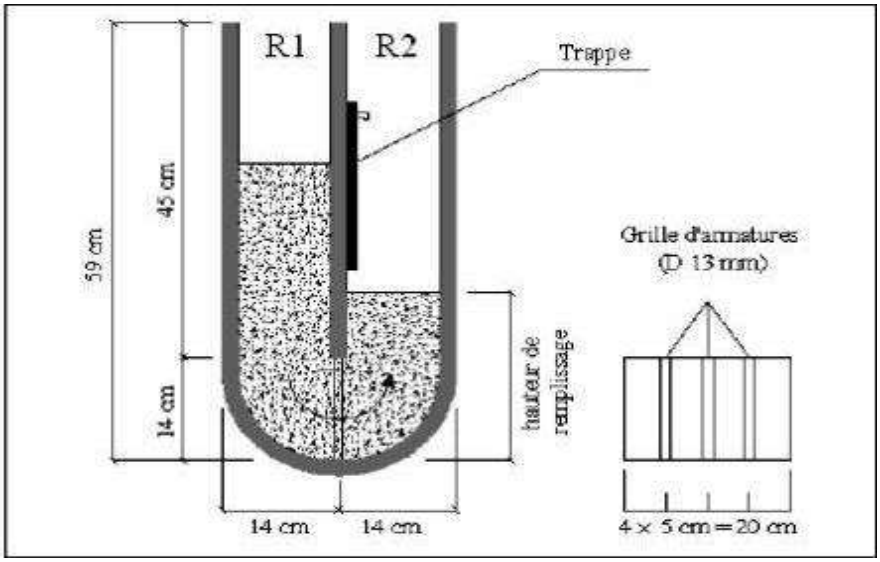


Figure I.7: Schématisation de l'essai du tube en U.

I.4.4.6. Essais de stabilité au tamis :

Cet essai vise à quantifier le risque de ségrégation des BAP. Il permet de compléter l'essai de la boîte en L. On prélève un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de 4.8 kg de béton et on relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance (Figure I.8).

Calculer le pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon, en arrondissant au pour cent près :

$$\%\text{Laitance} = \frac{P_{\text{Laitance}}}{P_{\text{échontillon}}} . 100 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(Eq I.6)}$$

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP [17] :

- 0%< % Laitance < 15% : Stabilité satisfaisante ;
- 15% < % Laitance < 30% : Stabilité critique ;
- % Laitance > 30% : Stabilité très mauvaise.

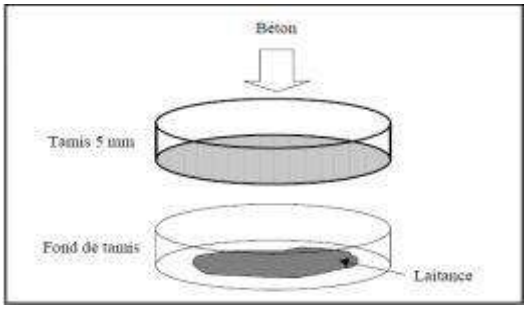


Figure I.8 : Essais de stabilité au tamis. [13]

I.5. Propriétés physico-mécanique des bétons autoplaçant :

I.5.1. Résistance à la compression :

La résistance à la compression est la contrainte maximale sous laquelle une éprouvette du béton se rompt. Elle est influencée principalement par deux facteurs à savoir : le rapport E/C (ou E/P) et la teneur en ciment (ou poudre). L'augmentation du premier mène à une diminution de la résistance à la compression, pendant que l'augmentation du deuxième conduit à une augmentation de la résistance du béton.

Du moment que le BAP est formulé avec un faible rapport E/P (0,28 à 0,42) et une teneur en poudre élevée (450 à 600 kg/m^3), sa résistance à la compression est plus grande que celle du béton vibré [25,50]. Domone [25] a analysé 68 cas à travers le monde où le BAP a été utilisé. Cet auteur a rapporté que la résistance à la compression des BAP est comprise entre 20 et 100 MPA, et que plus de 80% des mélanges testés ont des résistances supérieures à 40MPa. Ceci montre qu'en utilisant des BAP, il est possible d'obtenir une gamme de résistances allant de faible (20 MPA) à haute (100 MPA).

En ce qui concerne l'effet des ajouts minéraux sur la résistance du BAP, plusieurs chercheurs ont rapporté l'effet bénéfique des ajouts pouzzolaniques, alors que d'autres chercheurs ont montré l'effet négatif des fillers calcaires sur la résistance à la compression du BAP. Uysal et Yilmaz [51] ont étudié l'effet de la poudre de marbre, poudre de calcaire et poudre de basalte sur les propriétés des BAP. Ces auteurs ont rapporté que la résistance diminue au fur et à mesure que la teneur en addition augmente.

I.5.2. Résistance à la traction :

En général, la résistance à la traction dépend de la résistance à la compression. En effet, l'augmentation de la résistance à la compression mène vers l'augmentation de la résistance à la traction. Comme la résistance à la compression des BAP est plus grande que celle des bétons vibrés, la résistance à la traction des BAP est également plus grande [9, 35,52]. Dehwah [53] a trouvé des résistances à la traction qui varient entre 4,9 et 6,5 MPA. Des BAP confectionnés à base de différente teneur en cendres volantes ont développé des résistances qui varient entre 1,55 et 2,4 MPA [54].

I.5.3. Modules d'élasticité statique et dynamique :

Le module d'élasticité statique est le rapport entre la contrainte et la déformation qui la correspond dans le domaine élastique. Ce paramètre est lié à la résistance à la compression du

béton. En effet, l'augmentation de résistance à la compression mène vers l'augmentation des modules d'élasticité [51]. Ils sont affectés par le volume de la pâte, le volume et la qualité des gravillons. L'augmentation du premier facteur engendre une diminution des modules d'élasticité, pendant qu'ils augmentent avec l'augmentation du volume de gravillons et de leur qualité, ce qui peut être expliqué par le fait que la dureté des gravillons est plus grande que celle de la pâte [55].

Selon certains auteurs [56, 57], les modules d'élasticité des BAP coïncident avec ceux des bétons traditionnels pour la même classe de résistance. D'autres auteurs [58, 59] ont rapporté que du fait du faible volume et de la taille maximale réduite des gravillons et du volume de pâte élevé, les modules d'élasticité des BAP sont un peu faibles par comparaison à ceux des bétons traditionnels [51,52]. L'effet de l'utilisation des ajouts minéraux dans les BAP sur les modules d'élasticité a été étudié par plusieurs chercheurs [51,60]. Les résultats trouvés montrent que la substitution du ciment par des ajouts minéraux de différents types (inerte et pouzzolanique) conduit vers la diminution des modules d'élasticité.

I.5.4. Retrait de séchage ou de dessiccation :

Est la déformation volumique créée par le séchage à la surface du béton. Le moteur de la dessiccation est un déséquilibre hydrique après la prise, l'humidité relative est plus élevée au sein du béton que dans l'air ambiant. [1].

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs (Hu) [62] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés. Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé. Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires [63].

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [63, 64]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 μm/m (à 180 jours). Enfin, d'autres auteurs (Sonebi) [65] observent des retraits de séchage des BAP moins importants que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L, d'après (Neville) [66] ; augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage.

Comme expliqué précédemment, le retrait de dessiccation provient de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton vers le milieu extérieur. Le dessèchement est d'autant plus

fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande et les tensions créées par cette perte en eau s'amplifient également. Contrairement au retrait endogène, le retrait de dessiccation décroît donc avec la diminution du rapport E/C et les BAP ne font pas exception à cette règle.

Les résultats trouvés sur le retrait de séchage sont très partagés en deux parties, premièrement le BAP et le BO ont un retrait total semblable et deuxièmement Turcry et Boukni ; remarquent que les BAP donnent un retrait de séchage supérieur à celui des BO est ceci parce que le BAP contient un volume de fine élevé [37,46].

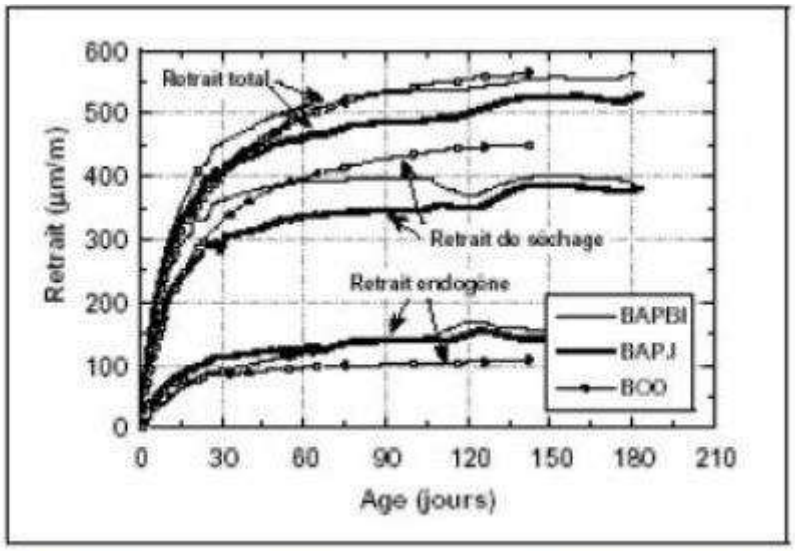


Figure 1.9 : Retraits des BAPB1 (E/C=0,50), BAPJ (E/C=0,43) et BO0 (E/C=0,45) (Turcry, 04).

Cette étape est pauvre des résultats de d'autres chercheurs (graphes qui représente l'influence de SP, granulats, addictions, E/C)

Cette étape vous aide à enrichir les constatations de chap. 2

I.6. EFFETS DES PARAMETRES DE COMPOSITION SUR LE BETON AUTOPLACANT A L'ETAT FRAIS ET A L'ETAT DURCI :

I.6.1. Effet des granulats sur les propriétés des BAP :

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits.

Pour le but d'utiliser des granulats concassés algériens des bétons autoplaçants, et de connaitre le facteur principal dominant dans le choix du squelette granulaire dans une formulation optimale du BAP à base des granulats locaux. Mr KORTEBY A [1] a fait son recherche sur « l'influence des caractéristiques des granulats de la région de Médéa sur les performances du béton autoplaçant », ce travail consiste à étudier l'influence des caractéristiques, types, classe, et la nature des granulats locaux sur les propriétés physiques et mécaniques ainsi que la durabilité du béton autoplaçant.

L'étude expérimentale effectuée a porté sur une variété de bétons (15 mélanges au total) pour lesquels les paramètres variables étaient la nature et le type du squelette granulaire. Trois types de sables et cinq types de graviers (Figures 6.1) à travers la région de Médéa ont été utilisés.

Tableau I.1. Différents mélanges de béton autoplaçant utilisées dans ce travail.

Famille de BAP	Notations	Les Différents mélanges du BAP	
		Granulats	
		Sable	Gravier
Famille 01	CB1	Corrigé	Bouaichoune
	CH1	Corrigé	El Hamdania
	CK1	Corrigé	Kaf El Assel
	CZ1	Corrigé	Boughezoul
	CM1	Corrigé	Mont Guorno
Famille 02	ZB2	Boughezoul	Bouaichoune
	ZH2	Boughezoul	El Hamdania
	ZK2	Boughezoul	Kaf El Assel
	ZZ2	Boughezoul	Boughezoul
	ZM2	Boughezoul	Mont Guorno
Famille 03	BB3	Bayazid	Bouaichoune
	BH3	Bayazid	El Hamdania
	BK3	Bayazid	Kaf El Assel
	BZ3	Bayazid	Boughezoul
	BM3	Bayazid	Mont Guorno

I.6.1.1. La nomenclature utilisée est la suivante :

Les lettres (C), (B) et (Z) désignent respectivement le type du sable : Corrigé (sable de Hassi bahbah et sable concassé), Bayazid (sables siliceux) et Boughezoul (sables siliceux), suivies de la lettre (B), (H), (K), (Z) ou (M) désignant les graviers concassés utilisés selon la zone de provenance : Bouaichoune, El Hamdania, Kaf El Assel, Boughezoul et Mont Guorno. Le chiffre 1 ,2 ou 3 renseigne sur la famille du mélange.

NB : la nomenclature utilisé est XYZ avec :

X= Sable : (C : Corrigé, Z : Boughezoul, B : Bayazid) ;

Y= Gravier:(B : Bouaichoune, H : El Hamdania, K : Kaf El Assel, Z : Boughezoul, M : Mont Guorno) ;

Z= Numéro de la famille (1, 2, 3).

I.6.1.2. Identification et Caractérisation des Constituants :

1. Sable :

Tableau I.2. Caractéristiques des différents types de sables utilisés.

Sables	Ab %	ESV%	ESP %	Mf	ρ_a (kg/l)	ρ_s (kg/l)	C (%)	P (%)	e
Bahbah	1.50	87.96	68.58	1,00	1.447	2.710	53.39	46.61	0.87
Concassé	0.55	87.45	83.92	3,55	1.511	2.653	56.98	43.02	0.76
Corrigé (C)	1.05	87.72	75.78	2,20	1.477	2.683	55.06	44.94	0.82
Boughezoul (Z)	1,44	70.14	60,70	2,20	1,439	2,587	55,60	44,40	0,80
Bayazid (B)	0,72	85.76	77,53	1,80	1,494	2,793	53,49	46,51	0,87

I.6.1.3. Résultats obtenus sur les BAP étudiés à l'état frais :

I.6.1.3.1. Essais d'étalement au cône d'Abrams et T50 :

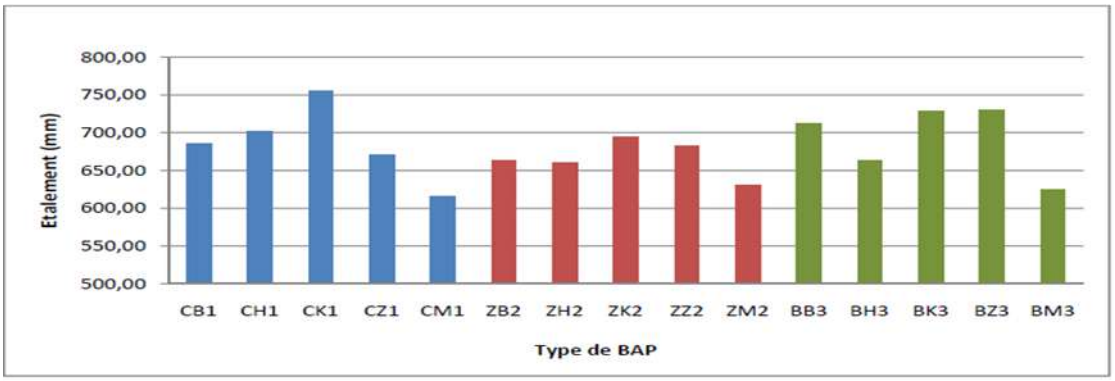


Figure I.10. Résultats d'étalement au cône d'Abrams des différents BAP réalisés. [1]

D’après les résultats de cette essai, il a constaté que tous les BAP ont des valeurs d’étalement comprises entre 615 mm et 755 mm, et par conséquent sont situées à l’intérieur du domaine des BAP classe SF2 (660 à 750 mm) définie par une bonne déformabilité sauf les mélanges du BAP confectionnés à base du gravier de Mont Guorno présentent des valeurs d’étalement moins de 660 mm et plus que le minimum 600 mm et ceci peut être justifié par leur forme plate [1].

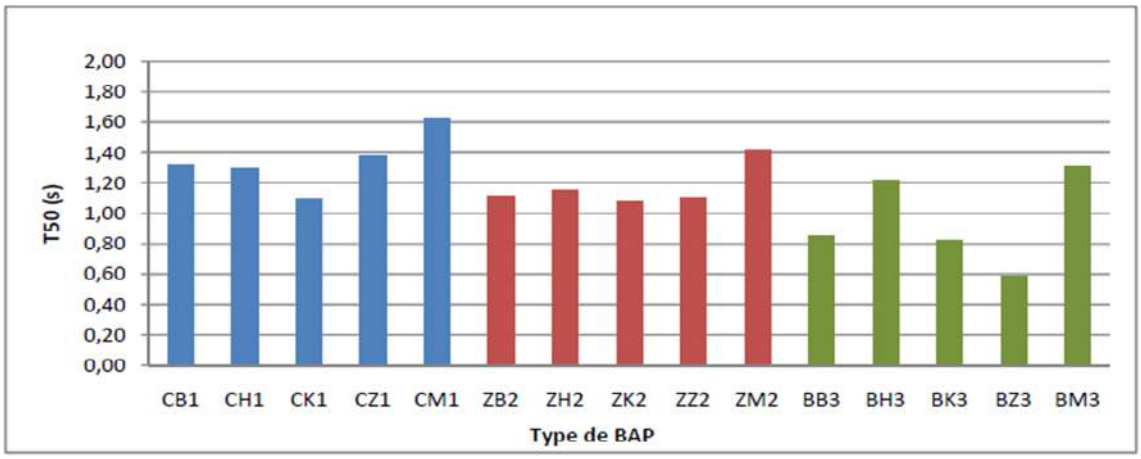


Figure I.11. Résultats du T50 des différents BAP réalisés. [1]

Le deuxième paramètre saisi à travers l’essai de l’étalement au cône d'Abrams, T50 c’est le temps nécessaire pour atteindre un diamètre de 50 cm. Nous remarquons que les valeurs de T50 sont plus basses que celles proposées par Aarre et Domone [25] (2 à 4 sec), Benchaa [97] aussi trouver la même chose. Ceci peut être expliqué par la viscosité élevée des mélanges et les valeurs d’étalement élevées (Figure I.10).

I.6.1.4. Résultats obtenus sur les BAP étudiés à l’état durci :

I.2.1.4.1. Résistance à la compression :

Dans ce sens, Benchaa [97] a trouvé que les meilleures résistances obtenues à 28 jours sont les résistances des BAP avec le mélange sable de concassage + sable alluvionnaire.

Selon korteby [1] Le gravier de Kaf El Assel (K) et le sable corrigé (C) donne le meilleur résultat pour le BAP CK1 avec une résistance à la compression qui vaut ≈ 60 MPA à 28j. par rapport aux BAP de la famille 02 et de la famille 03. Et il a observé pour tous les mélanges du BAP confectionné à base du gravier de Mont Guorno (M) des faibles résistances avec tous les sables.

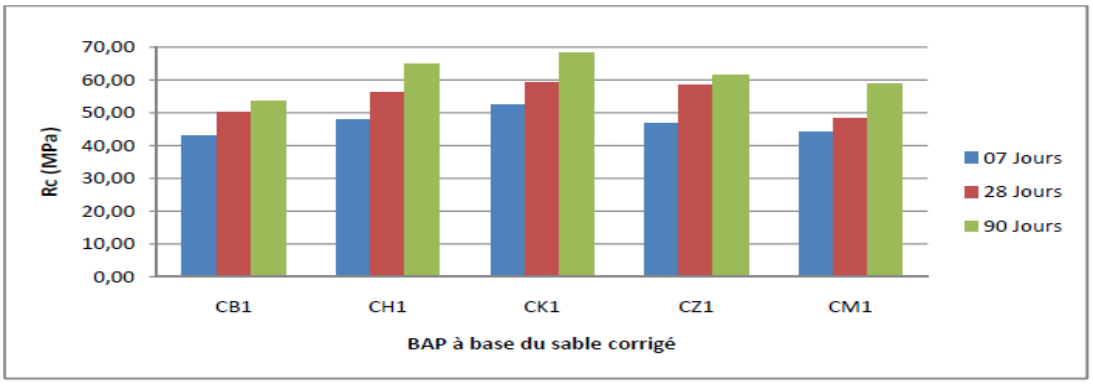


Figure I.12. Résistance à la compression des BAP de la famille 01. [1]

I.6.1.5. Conclusion :

D'après l'analyse de différentes propriétés des BAP, il semble que dans la wilaya de Médéa, la qualité du béton est fortement liée à la variété des granulats utilisés de la région. Dans ce contexte, l'amélioration de cette qualité dépend du bon choix et du meilleur mélange des granulats.

En particulier le squelette granulaire (sable et gravier) sur l'amélioration. De point de vue rhéologique, il a trouvé que le mélange du sable de Bayazid ainsi que les graviers de Kaf El Assel et de Bouaichoune présentent une bonne ouvrabilité d'après les différents essais effectués à l'état frais. A l'état durci, il peut conclure que les BAP confectionné à base du sable de Corrigé : (Concassé+Hassi Bahbah) donnent des bons résultats de point de vue résistance mécaniques et durabilité.

I.6.2. Effet des liants sur les propriétés des BAP :

I.6.2.1. Effets des additions minérales :

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, substituant ou non une partie du ciment. A l'origine, les ajouts ont été lancés pour des raisons économiques, soit ils existaient sous forme de produits naturels qui ne devaient être que peu traité comme la pouzzolane et le calcaire. Ainsi l'incorporation de ces additions minérales comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le cout de béton et contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite l'utilisation de grande quantité de combustible.

ETUDE 1

Pour le but d'étudier l'effet de substitution de 15% du poids du ciment par l'une des différentes additions minérales disponibles en abondance en Algérie, Mme BACHENE S [13] a fait sa recherche sur « l'effet couplé de la température et des additions minérales sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçant » telle que le laitier, la pouzzolane et le calcaire sous des températures de cure allant de 20 à 80°C**.**

I.6.2.2. Caractérisation des matériaux utilisés :

- Ils ont procédé l'étuvage des additions à 50C° jusqu'à obtenir une masse constante (ceci dans le but de faciliter leur broyage). Les additions ont été ensuite broyées à une finesse comparable à celle du ciment (3500 cm2/g).
- S/M = 0.5 ; G/S = 0.888 ; E/L = 0.42 ; Sp = 1.6%

Le ciment utilisé est un ciment portland artificiel CPA CEMI 42,5 provient de la cimenterie d'Ain El Kebira (SETIF).

Pour que le module de finesse du sable utilisé soit environ 2,50 ; on a combiné deux types de sable : fin de Hassi Bahbah (40%) et grossier de Mont Guorno (60%)

Le gravier utilisé est un gravier concassé à deux classes granulaires (3/8 et 8/15) provenant de la carrière de Mont Guorno de la région de Berrouaghia (Médéa)

I.6.2.3. Vérifications des bétons autoplaçants à l'état frais :

- **Essai d'étalement au cône d'Abrams :**

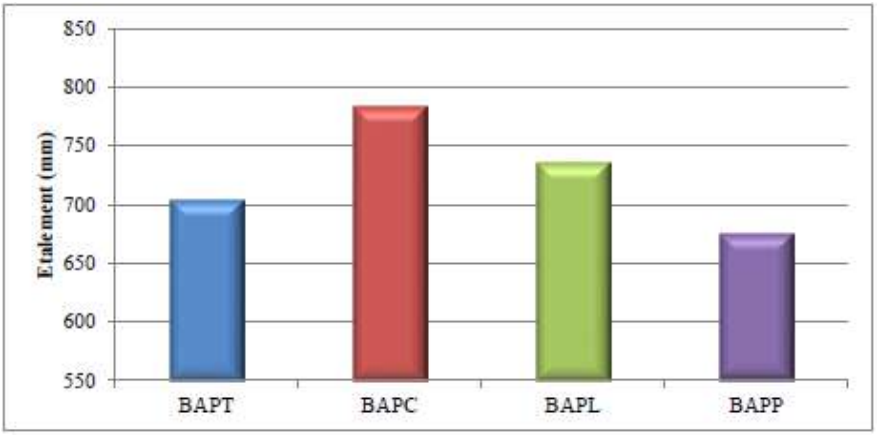


Figure I.13. L'étalement en fonction du type d'addition. [13]

D'âpres les résultats d'étalement des différents BAP, Tous les bétons ont des valeurs d'étalement Proche à la limite supérieure qui est de 800 mm, le BAPC a un étalement de 784

mm, qui améliorent l'étalement de façon remarquable. La composition choisis assure une bonne fluidité des bétons quel que soit l'addition.

I.6.2.3.1. Mesure du temps T50 :

Tous les mélanges ont vérifié les propriétés d'écoulement d'un béton autoplaçant. Ainsi que L'incorporation du calcaire et du laitier de haut fourneau améliore toutes les paramètres à l'état frais, de façon remarquable le calcaire est le plus efficace. La pouzzolane naturelle dégrade la capacité des bétons au passage et au remplissage.

I.6.2.4. Effet des additions sur les caractéristiques des bétons autoplaçants à l'état durci :

I.6.2.4.1. Résistance à la compression :

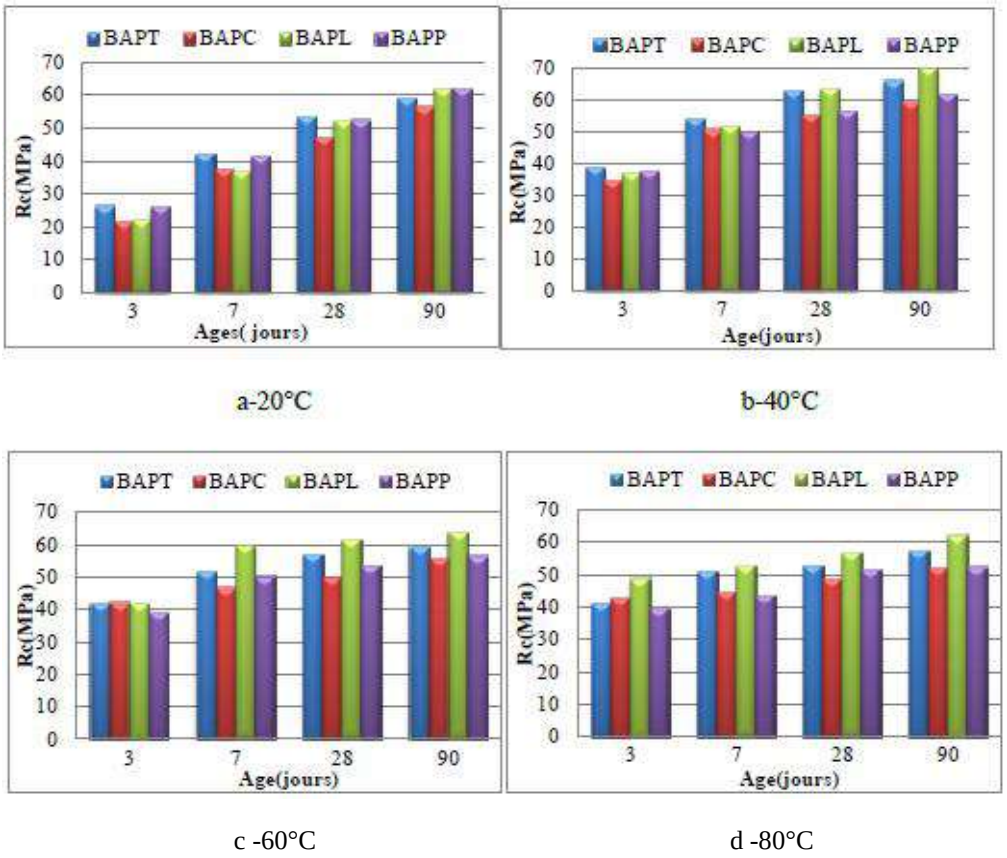


Figure I.14. Résistance à la compression des différent BAP à chaque température de cure. [13]

D'après les résultats de Bachene. S [13] il semble que le calcaire mène à une baisse de résistance. Le laitier des hauts fourneaux a présenté la meilleure efficacité avec l'augmentation

de la température de cure, et la pouzzolane a présenté une augmentation importante de la résistance à long terme à 20°C et 40°C et une légère diminution à 60°C.

Selon les recherches de Derabla [17], l'incorporation de 20% de calcaire dans un béton autoplaçant est plus efficace à 28 et 90 jours avec un traitement thermique de 60°C que sans traitement thermique.

Hadj Sadouk [98] a remarqué que pour les deux milieux de conservation (cure à 20°C et climat chaud), un taux de 15% de calcaire provoque des chutes de résistances des mortiers pour tous les âges d'essai.

I.6.2.4.2. Module d'élasticité :

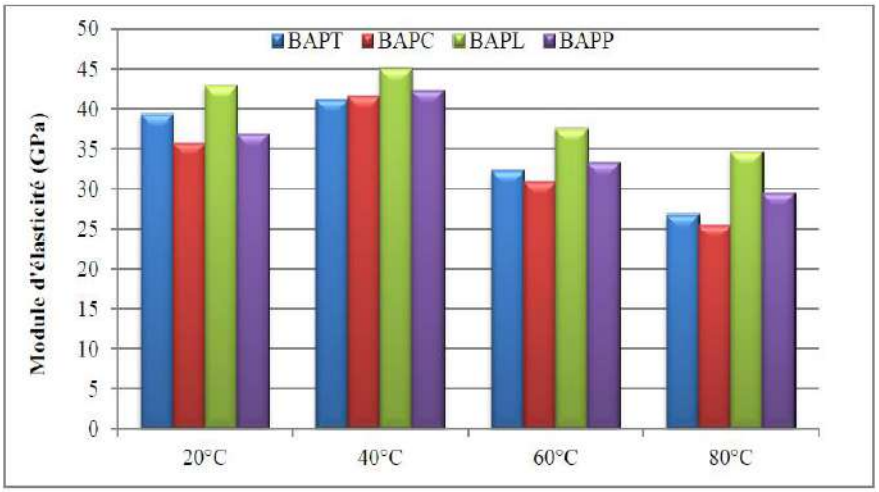


Figure I.15. Module d'élasticité à 28jours en fonction de la température de cure. [13]

La substitution du ciment par une addition minérale à un effet sur le module d'élasticité dépend du type d'ajout, Les valeurs à 20°C varient entre 35 et 42 GPa, en effet beaucoup de chercheurs [99,100, 101] ont trouvé une différence dans le module d'élasticité qui change entre 0 à 6 GPa à une température de 20° C, L'efficacité du laitier augmente avec l'élévation de la température de cure. Boukni [46] a montré que, l'accroissement du dosage en fillers calcaires dans un béton autoplaçant influence négativement sur l'évolution du module d'élasticité.

I.6.2.5. Conclusion :

Les résultats de cette étude sont résumés dans les points suivantes :

- Le laitier des hauts fourneaux améliore la porosité et l'absorption des BAP contrairement à l'addition calcaire qui nuire ces deux critères, et cela pour toutes les températures de cure.
- La porosité et l'absorption des BAP à base de la pouzzolane naturelle sont affectées négativement par l'augmentation de la température de cure.

- Il est possible d'avoir des propriétés autoplaçants pour tous les BAP lorsque le ciment est substitué par 15% de l'un des additions employées dans cette étude. Toute fois un gain dans les mesures de fluidité et de déformabilité a été observé par l'emploi du calcaire ou laitier, contrairement à la pouzzolane qui a développé un BAP moins ouvrable mais le plus stable vis-à-vis la résistance à la ségrégation.

ETUDE 2

Le travail de TALEB M [103] s'articule sur l'optimisation de la pâte d'un béton autoplaçant (BAP) à base d'ajouts cimentaires locaux pour aboutir à une formulation de pâte autoplacante, plusieurs essais de mesures des diamètres d'étalement au mini-cône ont été effectués sur des pâtes a différent dosage en superplastifiant et à différent pourcentage d'ajouts cimentaires (marbre et tuf) pour déterminer le point de saturation de l'adjuvant. Par la suite une caractérisation à l'état frais et durci est effectuée sur des bétons autoplaçants,

Les objectifs de cette étude étaient de produire un béton autoplaçant économique de faible impact environnemental à travers l'exploitation des poudres de marbre et de tuf qui sont disponibles dans le marché Algérien.

Il a fixé :

- Le rapport eau/liant (E/L=0.28),
- La quantité des ajouts comme addition (marbre ou tuf), 10% du poids de ciment.
- La quantité de liant.

Il a varié :

- Le type des ajouts cimentaires tuf et marbre ;
- La finesse des ajouts cimentaires tuf et marbre, (deux finesses pour chaque ajouts).
- La quantité des ajouts comme substitution, (10%, 20%, 30%) du poids de ciment.
- Le dosage en superplastifiant (SP) varie de 0.8 à 2% par rapport à la masse de liant.

I.6.2.6. La notation des pâtes étudiées est donnée comme suit :

PPTT : Pâte de ciment témoin à base d'ajout de poudre de tuf comme addition.

PPT10 : Pâte de ciment à base de tuf en substituant 10 %, de ciment par le tuf.

PPT20 : Pâte de ciment à base de tuf en substituant 20 %, e ciment par le tuf.

PPT30 : Pâte de ciment à base de tuf en substituant 30 %, de ciment par le tuf.

- Et la méme façon appliqué pour celles de la pâte de ciment à base d'ajout de marbre.

Les données de base :

On a choisi :

- G/S=0,9.

- On fixe le rapport E/(C+F) =0,41-

I.6.2.7. Les compositions des différents bétons sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.3. Constituants pour 1m3 du (BAP) [103]

Type de BAP / Constituants (kg)	BAPM1	BAPM2	BAPT1	BAPT2
ciment.	320	320	320	320
addition	40	40	40	40
substitution	80	80	80	80
superplastifiant	6.16	6.16	6.16	6.16
Eau	176.12	176.12	176.12	176.12
Sable (0/4)	940	940	940	940
Gravier 3/8	506	506	506	506
Gravier 8/15	337	337	337	337

I.6.2.8. Essais et caractérisation sur béton frais :

Selon des essais au mini-cône ils a trouvé les résultats suivants :

- ✓ Quel que soit la composition de la pâte étudiée (pour les deux types d'ajouts ; tuf et marbre) quand le dosage du superplastifiant augmente l'étalement augmente.
- ✓ Le point de saturation (dosage en adjuvant) est variable selon la composition de la pâte (type d'ajout, la finesse de l'ajout et le taux de substitution du ciment par l'ajout).
- ✓ Dans toutes les pâtes optimisées (étalements maximales), le dosage de saturation en adjuvant est de 1.4% quelque soit l'ajout et la finesse.

I.6.2.9. Essais et caractérisation du béton durci :

Les essais de la résistance mécanique en compression sont réalisées sur des éprouvettes cylindrique (11×22 cm3). L'essai effectué sur les différents bétons aux âges (28 jours) ont donné les résultats présentés dans (la Figure I.15)

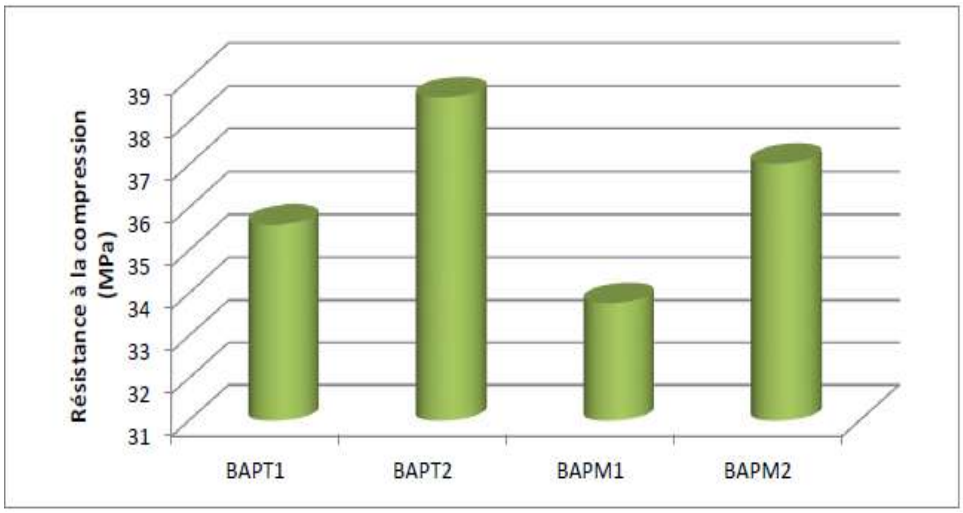


Figure I.16. Résistance à la compression à 28 jours des différents BAP

D'après les résultats de cette essai Taleb.M [103] a découvrir que les bétons autoplaçants (BAP) ont des résistances à la compression acceptables (supérieurs à 33MPa), ce qui les met toujours comme des bétons courants.

La résistance à la compression à 28 jours du BAPT2 est meilleure par rapport aux autres BAP étudiés et elle est augmenté (pour les types d'ajouts) quand la finesse augmente par la favorisation d'utilisation des ajouts avec une finesse élevée à cause de leur effet positif sur la compacité et par voie de conséquence sur la résistance à la compression.

I.6.2.10. Conclusion :

Après les résultats obtenus Taleb.M a résumé les conclusions suivantes :

- Les quatre (04) BAP ont présenté une bonne stabilité au tamis, donc pas de ségrégation statique.

- la résistance à la compression à 28 jours du BAPT2 (poudre de tuf avec la plus grande finesse) est meilleure par rapport aux autres BAP étudiés

- Il est possible d'utiliser des matériaux locaux tels que la poudre de marbre et la poudre de tuf dans la confection de béton autoplaçant.

- De point de vue rhéologique et économique, la substitution de 20% du ciment par la poudre de marbre ou la poudre de tuf semble être très bénéfique.

- L'ajout de marbre peut donner les meilleures performances rhéologiques (étalement) par rapport à celui du tuf notamment s'il est bien broyé (surfaces spécifiques élevées). En revanche, le tuf peut donner des performances mais pour des surfaces spécifiques modérées (inferieur à celles du ciment).

I.6.3. Effet du superplastifiant sur les propriétés des BAP :

Le superplastifiant joue un rôle de défloculant en s'adsorbant sur les grains, donc il empêche les grains se rapprocher pour former des amas sous l'effet des forces de Van der Waals. La perméabilité (k) du milieu augmente comme le carré de la taille des flocs La défloculation des agrégats par le superplastifiant va donc entraîner une diminution importante de la perméabilité, et par voie de conséquences la filtration, d'où une stabilisation de la pâte.

Bouras Rachid [104] a étudier l'influence des adjuvants organiques comme le superplastifiant sur le comportement rhéologique et la résistance par rapport à la séparation fluide-solide de pâtes de ciment utilisées pour la formulation de bétons autoplaçants.

I.6.3.1. FORMULATION DES PAP :

Tableau I.4. Formulation du pate PAP

Gravier (kg/m^3)	*Sable* (kg/m^3)	*Filler* (kg/m^3)	*Ciment* (kg/m^3)	*Eau* (l/m^3)	*SP* (kg/m^3)	*AV* (kg/m^3)
700-800	***900-1000***	***120-140***	***280***	***200***	***5-6***	***2,5***

Nous considérons de manière indépendante l'influence du dosage en agent de viscosité (AV). Partant de la pâte de référence désormais dénotée PAP, nous formulons 4 autres pâtes en changeant le dosage en A.V. : PAP-100% A.V., PAP-50 A.V., PAP+100% A.V., PAP+50% A.V.

I.6.4.2. INFLUENCE DE SUPERPLASTIFIANT SUR L'OUVRABILITE :

Dans cette partie Bouras R [104] a étudier l'influence des adjuvants organiques comme les superplastifiants sur le comportement d'écrasement à partir des mesures d'efforts d'écrasement en fonction du déplacement et a déterminé les diagrammes d'ouvrabilité pour chacune des pates. Pour cela il A effectué des essais d'écrasement avec des pâtes PAP et la teneur en SP a été modifiée,

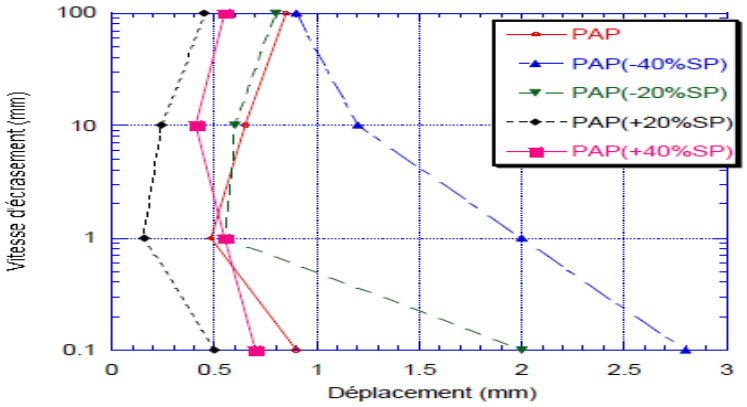


Figure I.17. Zone d'écoulement des pâtes PAP en changeant SP (à droite des courbes c'est la partie écoulement et à gauche c'est la partie blocage) [104]

Bouras R [104] A remarqué que Dans le cas du plus faible dosage en SP utilisé (PAP-40 : 1,2g SP/100g ciment), l'ouvrabilité de la pâte est pratiquement aussi mauvaise que celle des pâtes ordinaires. Donc le dosage en SP étant loin de sa valeur optimale, s'attendre un matériau de grande perméabilité. Comme il s'attendait l'augmentation de la quantité de SP menée à une amélioration de l'ouvrabilité des pâtes

I.6.4.3. Conclusion :

Les résultats de cette étude rhéologique montrent que :

- Le superplastifiant admet nettement plus d'influence que l'agent de viscosité.
- Le superplastifiant agit directement sur la configuration des particules solides dans la pâte, modifiant ainsi de manière importante les propriétés rhéologiques. Cependant une quantité excessive de superplastifiant peut être inutile sur le comportement de la pâte. Il est donc important de déterminer une quantité optimisée de superplastifiant.
- Les superplastifiants, par leur action de défloculation, ont une grande influence sur l'ouvrabilité. L'agent de viscosité avait aussi un rôle non-négligeable. Cela a été expliqué par le fait que l'agent de viscosité modifie la phase fluide en augmentant sa viscosité ce qui diminue la filtration entraînant l'augmentation de la stabilité de la pâte.
- La quantité excessive de superplastifiant contribue en partie à l'intercalation dans les produits d'hydratation. Le polymère intercalé n'est plus disponible pour le processus de dispersion, ce qui diminue son efficacité.
- Les essais de compression peuvent être utilisés pour caractériser l'ouvrabilité des pâtes. Des diagrammes d'ouvrabilité, caractérisant les vitesses et les interstices pour lesquels la pâte peut s'écouler sans séparation fluide-solide, ont été déterminés à partir des essais de compression.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été effectué dans le cadre de l'Analyse de l'influence de certains paramètres sur les propriétés d'un béton autoplaçant. Les observations et les analyses que nous avons effectuées dans le cadre de cette étude pourraient mener à tirer les conclusions suivantes :

Les BAP sont des bétons spéciaux très fluides, homogènes et stables, dont la spécification est de se mettre en place sous l'effet de leur propre poids à l'aide de sa fluidité et homogénéité sans apport de vibration externe ou interne.

À travers la synthèse bibliographique on a montré que les caractéristiques des granulats dépendent de la nature et de la qualité du matériau d'origine d'une part, et de leurs conditions d'exploitation d'autre part. Les résultats de la relation entre les propriétés des BAP à l'état frai et à l'état durci sous l'effet de certains paramètres ont rendu possible la mise en évidence de l'influence du facteur « type et nature du granulat », Cette étude a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les granulats locaux utilisé dans le travail de korteby répondent aux exigences des normes et règlements en vigueur, excepte celles relatives à la finesse du sable (sable de Hassi Bahbah), ce qui il a obligé d'utiliser en plus un sable grossier (concassé), ainsi que la dureté faible du gravier de Boughezoul
- Bouras.R montré que les superplastifiants, par leur action de défloculation, ont une grande influence sur l'ouvrabilité. Cela a été interprété dans le cadre de la loi de filtration de Darcy. L'agent de viscosité avait aussi un rôle non-négligeable. Cela a été expliqué par le fait que l'agent de viscosité modifie la phase fluide en augmentant sa viscosité ce qui diminue la filtration entraînant l'augmentation de la stabilité de la pâte.
- La résistance à la compression à 28 jours du BAPT2 (poudre de tuf avec la plus grande finesse) est meilleure par rapport aux autres BAP étudiés.

Références Bibliographiques

[1]. KORTEBI, A., 2015, « Etude de l'influence des caractéristiques des granulats de la région de Médéa sur les performances du béton autoplaçant ».

[2] BOUKHELKHAL, A.,2012, « Rheologie, caractérisatin physico-mécanique et durabilité des bétons autoplaçants à base de la poudre de marbre ».

[3] OKAMURA, H. et OZAWA, K. (1995). Mix design for self compacting concrete, Concrete Library of JSCE, n° 25, p107-120.

[4] OZAWA, K. (2001). Utilization of new concrete technology in construction project - Future prospects of self-compacting concrete. In The 2nd International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Ozawa, K. et Ouchi, M., editors, p.57-62.

[5] AFGC : Association Française du Génie Civil Les BAP : Recommandations provisoires pour l'emploi des bétons autoplaçants. Janvier 2008. Disponible sur : http://www.afgc.asso.fr/images/stories/pub/Recommandations-IV.AFGC-version-francaise.pdf

[6] ALI–BOUCETTA, T.,2014, « Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçant et de hautes performances ».

[7] RILEM. (2001). Self-Compacting Concrete, State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Edited by Skarendahl, A. et Petersson, O., RILEM Publications, France.

[8] Liu, M, "Wider application of additions in self-compacting concrete ", Doctoral Thesis of University College London, UK, 2009.

[9] Sonebi, M., and Bartos P.J.M, " Hardened SCC and its bond with reinforcement ", Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, 13-15 September, 1999 ; 275-89.

[10] Ozawa, K., Maekawa, K., and Okamura, H, " Development of high performance concrete ", Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 1992 ; 41(3) : 381-439. 26*

[11] Felekoglu, B, “A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in selfcompacting concrete”, Construction and Building Materials 2008, 22(4) : 646-54.

[12] Noumowe, A., Carre, H., Daoud, A., and Toutanji, H, “High-strength self compacting concrete exposed to fire test”, Journal of Materials in Civil Engineering 2006, 18(6) : 754-8.

[13] BACHEN, S. (2015). Effet couplé de la température et des additions minérales sur les caractéristiques mécanique et la durabilité des bétons autoplaçant.

[14] NEHDI M., 2000 « Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials », Cement and Concrete Research J., Vol. 30, pp. 1603-1669.

[15] KHELIFA R., 2002 « L’impact des cimenteries sur l’environnement, Cas de la cimenterie de Ain-Touta », Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d’Orléans.

[16] Rapport d’essais préliminaires, 2005« Etude de ciments aux ajouts », Entreprise Régionale des Cimenterie de l’Est ERCE, Cimenterie de Ain-Touta.

[17] DERABLA, R. (2015). « Influence des additions minérales sur le comportement au jeune âge et à long terme des bétons autoplaçants traités thermiquement ».

[18] BENAKLI S, « caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par

Ajout des déchets de construction »

[19] Okamura, H, “Ferguson lecture for 1996 : self-compacting high-performance concrete”, Concrete International 1997 ; 19(7) : 50-54.

[20] Okamura, H., and Ouchi, M, “Self-compacting concrete”, Journal of Advanced Concrete Technology 2003, 1(1) : 5-15.

[21] Yurugi, M., Sakata, N., Iwai, M., and Sakai, G, “Mix proportion for highly workable concrete”, Conference Concrete 2000, Dundee, UK, 7-9 sept, 1993, 579-89.

[22] Okamura, H., Ozawa, K, “Self-compactable high-performance concrete in Japan ”, in Japan SP-169, ACI 1994 ; 31–44. 27*

[23] Billberg, P, “ Mix design model for self-compacting concrete ”, in : the First North American Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete, Skarendahl A, editor, Chicago, USA, 2002 ; 65-70.

[24] Skarendahl, A, “ The present-The future ”, in : The third International RILEM Symposium on SelfCompacting Concrete, Wallevik OH, Nielsson I, editors, RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France, 2003 ; 6-14.

[25] Domone, P.L, “Self-compacting concrete : An analysis of 11 years of case studies”, Cement and Concrete Composites 2006 ; 28(2) :197-208.

[26] SPENGLER A., SCHIESSL P., 2001 « Sand-rich Self-Compacting Concrete » Proceedings of the second International Symposium on Self-Compacting Concrete, Japan, pp. 387-392.

[27] DREUXG., FESTAJ., 1998 « Nouveau guide du béton et de ses constituants » huitième édition, Eyrolles, France.

[28] Haddadou N., (2015) « Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre ».

[29] Sugamata T., Umezawa K. and Okazawa S., A study of particle dispersing retention effect of polycarboxylate-based superplasticizers. Transactions of NMB Central Research Laboratories - Japan, Vol. 13 : 7-14, 2000.

[30] Fares H., Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée. Thèse de doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2009, 192 p.

[31] Elhilali A., Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP)- influence des fines calcaires et des fibres végétales. Thèse de doctorat de l’université Cergy Pontoise 2009, 183 p.

[32] Tangtermsirikul, S., and Van, B.K, “Blocking criteria for aggregate phase of Self-Compacting high performance Concrete”, Proceeding of Regional Symposium on Infrastructure Developm ent in Civil Engineering, SC-4, Bangkok, Thailand, December 19-20, 1995 ; 58-69.

[33] Petersson, O., Billberg, P., and Van, B.K, “A model for self compacting concrete ”, In : the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete. Bartos PJM, Marrs DL, Cleland DJ, editors, E&FN Spon, London, 1996 ; 484-92.

[34] Petersson, O., and Billberg, P, “ Investigation on blocking of self-compacting concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler ”,

Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 13-15 September, 1999 ; 333–44.

[35] EFNARC, “Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete”, European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, EFNARC, Norfolk, UK, February 2002, 32pp.

[36] Sedran T. and De Larrard F. "Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model", Proceedings of the First International RILEM Symposium SelfCompacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp.321-332.

[37] Turcry.P, “Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation”, Thèse doctorale, université de Nantes, 2004.

[38] EL BARRAK M., 2005« Contribution à l’étude de l’aptitude à l’écoulement des bétons autoplaçants à l’état frais » Thèse de Doctorat de l’Université Toulouse III – Paul Sabatier, France, 228 pages.

[39] SEDRAN T., 1999« Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants », thèse de doctorat de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.

[40]] Skarendahl.A, Petersson.O, “ Self- compacting Concrete : State-of-the-art report of RILEM Technical Commite 174-SCC”, RILEM Publication, France, 2001.

[41 Legrand.C “La structure des suspensions de ciment”, Le béton hydraulique, Presses dr l’ENPC, 1982.

[42] KHAYAT K., 1999, « Les Bétons Autonivelants, Les Bétons : Bases et Données pour leur Formulation, Association Technique de l’Industrie des Liants Hydrauliques », Edition Eyrolles, Paris, Troisième Tirage.

[43] Othmane BOUKENDAKDJI, « Etude de l’influence des paramètres de formulation sur les propriétés d’un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires » Thèse de Doctorat d’état, Institut Génie Civil, Université de Blida, Algérie (2010).

[44] Ozawa K., Sakata N. and Okamura H., Evaluation of Self-Compactibility of Fresh Concrete Using the Funnel Test. Concrete Library of JSCE, (25) June 1995, pp. 59-75.

[45] NF EN 12350-9 : Essai pour béton frais - Partie 9 : béton autoplaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V, 2010.

[46] Boukni B., Contribution à l'étude expérimentale du comportement thermomécanique des bétons autoplaçants. Thèse Doctorat en science en Génie Civil. Université Mentouri Constantine, Juin 2012. 144p.

[47] EFNARC : Specification and guidelines for self compacting concrete. Mai 2005. Disponible sur http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf

[48] The European Guidelines for Self-Compacting Concrete : Specification, Production and Use. May 2005.

[49] Skarendhahl, A, "Self-compacting concrete in Sweden. Research and application ", Proceedings of the International Workshop on Self-Compacting Concrete", Self-Compacting Concrete Sub-Committee, Concrete Committee. Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, March 1999, 68pp.

[50] Holcim, "Le béton autocompactant", 1ère édition, Suisse, 2005.

[51] UYSAL M., YILMAZ K., 2011« Effect of mineral admixtures on properties of selfcompacting concrete », Cement and Concrete Composites J., Vol. 33, pp.771-6.

[52] Felekoglu, B., Turkel, S., and Baradan, B, "Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete", Building Environment 2007 ; 42(4) : 1795–802.

[53] Dehwah, H.A.F, " Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume or fly ash ", Construction and Building Materials 2012 ; 26 : 547–51. 30*

[54] Siddique, R, "Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash", Materials and Design 2011 ; 32 : 1501–7.

[55] Roziere, E., Granger, S., Turcry, P., and Loukili, A. " Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete ", Cement and Concrete Composites 2007 ; 29 : 626–36.

[56] Gram, H.E., and Pentti, P, " Propretés of SCC - especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance ", Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete,

[57] Persson, B, “ A comparison between mechanical properties of self compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete ”, Cement and Concrete Research 2001 ; 31 : 193–8.

[58] Leemann, A., Lura, P., and Loser, R, “Shrinkage and creep of SCC – the influence of paste volume and binder composition”, Construction Building Materials 2011 ; 25 : 2283–9.

[59] Dehn, F., Holschemacher, K., and Weibe, D, “Self-compacting concrete time development of the material properties and the bond behavior”, The Leipzig Annual Civil Engineering 2000, Germany, ISSN 1432-6590, LACER N0 5 : 115–24.

[60] Uysal, M., Yilmaz, K., and Ipek, M, “The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete”, Construction and Building Materials 2011 ; 27(1) : 263-70.

[61] GUNEYISI E., GESOGLU M.,2008 « A study on durability properties of highperformance concretes incorporating high replacement levels of slag » Materials and Structures J., Vol. 41, pp. 479–493.

[62] HU C, et BARBIERI B, « Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d’un béton fluide traditionnel », Science des matériaux et propriétés des bétons, pp.265-272, 1ère Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 mars 1998.

[63] PERSSON B, “ Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete ”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 239-250, 13-15 septembre 1999.

[64] SAKATA K, “Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete”, CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057-2064, Tronso, GB, 1998.

[65] SONEBI M, BARTOS P. J. M, “ Hardened SCC and its bond with reinforcement ”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 septembre 1999.

[95] NEVILLLE A M, “ Propriétés des Bétons ”, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.

[96] Aarre T. and Domone P. “Reference concretes for evaluation of test methods for SCC” Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland. 2003, pp. 495-505.

[97] Benchaa BENABED, « Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants » Thèse de DOCTORAT, DE L'UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT Spécialité GENIE CIVIL, 2014.

[98] HADJ SADOK.A., 2012, « Caractéristique mécanique et durabilité des mortiers à base de ciment au calcaire », Thèse de Doctorat, Université Hassiba Ben Bouali., Algérie.

[99] LUKE K., GLASSER F. P., 1987 « Selective dissolution of hydrated blast furnace slag cements » Cem. Concr. Res J., Vol. 17(2), pp. 273–82.3.

[100] BOUIKNI A., 2010, Comportement du béton a base du laitier d'El-Hadjar sous différentes cures, Thèse de Doctorat d'état en Génie Civil, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie.

[101] SWAMY R.N., MAHMUD H.B., 1998« Mix proportions and strength characteristics of concrete containing 50 per cent low-calcium fly ash », ACI publ SP -91, Vol. 1, pp. 413-432.

[102] Flatt R. J., Martys N. S., Bergström L. (2004) : La Rhéologie des Matériaux Cimentaires (The Rheology of Cementitious Materials). National Institute of Standards and Technology. Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, Nº 867, pp. 48-55, Juin-Juillet

[103] TALEB M, A 2017 Optimisation de la pâte d'un béton autoplaçant (BAP) à base d'ajouts cimentaires locaux » thèse Master en Génie des matériaux, Boumerdes, Algérie.

[104] Bouras R, A 2011 « RHEOLOGIE DES PATES CIMENTAIRES POUR BETONS AUTOPLAÇANTS » thèse de Doctorat en Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie.