

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat



**FACULTÉ DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : ADJALAT AHMED BEN BELLA & BEN RAMDHAN LAKHDAR

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE.

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MGC

Thème

**Influence du mode de conservation sur les
propriétés physico-mécaniques des bétons
auto-plaçants**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. Belaidi Akram Salah Eddine	Professeur	Président
Mme. Djoudi Amina	Maitre de conférences	Examinatrice
Mme. Merghoub Messaouda	Maitre Assistant A	Encadreur
Mr. Azzouz Lakhdar	Professeur	Co-Encadreur

Promotion : Septembre - 2020

Remerciements

On tient tout d'abord à remercier notre dieu, le tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens tout d'abord _à remercié chaleureusement les membres du jury .Le Professeur BELAIDI Akram Salah Eddine et Maitre de conférences Djoudi.Amina pour l'intérêt qu'ils ont porté, en acceptant d'examiner notre travail de fin d'étude.

Nous tenons à remercier nos encadreurs, Mme MERGHOUB Messaouda Maitre-assistant A et Monsieur Azzouz Lakhdar Professeur à l'université de Laghouat, pour leurs précieux conseils et aides durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux; Monsieur BOUKHELKHAL Aboubakeur qui a toujours su m'apporter ses conseils, Monsieur Merrah Ahmed d'avoir été à mes côtés , Madame BOULAGHMEN Farida Adjoint au chef du département de Génie civil pour ces encouragements et son soutien moral, Monsieur HAMDI Brahim chef de laboratoire de Génie civil de son aide précieuse et ces conseils, son soutien sans faille.

Mes sincères remerciements à tous le personnel de laboratoire LACOTECH qui nous a beaucoup aidé dans les essais .

. Également nous remercions énormément tous les enseignants du département de génie civil à l'université de Laghouat, ainsi que le personnel de laboratoire de recherche de génie civil, qui nous a offert toutes formes d'aides.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents ALLAH YARHAMHOUM

A ma chère femme pour m'avoir soutenue, encouragée et supportée
durant la préparation de ma thèse

A mes chères filles les lumières de mes jours : Sirine ,Achouak , Lina ,
Isra mes sources de bonheur et de joie que Dieu tout puissant mes les
gardes toujours à mes côtes .

A Mon cher ami et beau-frère Chenaf tahar Il a su me conseiller,
m'épauler Merci pour votre patience et votre soutien.

A Mon cher ami Medahi Madjid PDG de Granitex, pour son écoute, ses
conseils et son aide, Je lui témoigne ici toute ma gratitude.

AHMED



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A ma chère femme d'avoir été à mes côtés, mon soutien moral

A mes chères filles : Soussen ,Inas *Lumière De Mon Chemin Et Les étoiles De Ma Vie*

A mon ami et frère Adjalat ahmed ben bella Merci pour votre patience et votre soutien.

Mes chers frères

A toute ma famille et tous mes amis

LAKHDAR

Résumé:

Cette étude expérimentale présente l'effet du mode de cure et la durée de cure initiale sur les propriétés du bétons autoplaçants (BAP) à base d'un ciment CPA CEM I 42,5. Il s'agit d'étudier l'influence du mode de cure sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression), la vitesse ultrasonique (UPV). Trois régimes de cure ont été appliqués sur les BAP, conservation à l'air libre, dans l'eau, sous film plastique en variant la durée et la condition de la conservation des éprouvettes en BAP. Les résultats de la résistance à la compression obtenus montrent qu'une durée de cure dans l'eau, et sous plastique est meilleure en comparant avec l'autre régime de cure (à l'air). Les résultats montrent bien qu'il y a une bonne relation (corrélation) entre UPV et la résistance à la compression.

Mots clés : BAP, durée de cure, UPV

Abstract:

This experimental study presents the effect of the cure mode and the initial cure duration on the properties of self-compacting concrete (SCC) based on CEM I-A42.5 cement. The aim is to study the influence of the cure mode on the mechanical properties (compressive strength), ultrasonic speed (UPV). Three curing regimes were applied to the BAPs. Storage in the open air, in water, under polyane film, varying the duration and the condition of the storage of the BAP specimens. The results of the compressive strength obtained show that a cure time in water, and under plastic is better compared to the other cure regime (in air).

The results clearly show that there is a good relationship (correlation) between UPV and compressive strength.

Key words: SCC, Duration of cure, UPV

ملخص:

تعرض هذه الدراسة التجريبية تأثير وضع المعالجة ومدة المعالجة الأولية على خصائص الخرسانة ذاتية الدمج (SCC) على أساس أسمنت CPA CEM I 42.5. الهدف هو دراسة تأثير وضع العلاج على الخواص الميكانيكية (قوة الضغط) سرعة الموجات فوق الصوتية (UPV). تم تطبيق ثلاثة أنظمة معالجة على تخزين BAP في الهواء الطلق ، في الماء ، تحت طبقة بوليان ، متغيرة المدة وحالة تخزين عينات BAP. تظهر نتائج مقاومة الانضغاط التي تم الحصول عليها أن وقت المعالجة في الماء وتحت البلاستيك أفضل مقارنة بنظام العلاج الآخر (في الهواء). تظهر النتائج بوضوح أن هناك علاقة جيدة (ارتباط) بين UPV وقوة الضغط.

SOMMAIRE	page
Remerciements	
Dédicaces	
Introduction Générale.....	01
CHAPITRE 1	
Etude Bibliographique	
1-1 Introduction.....	04
1-2 Intérêts techniques des BAP.....	05
1-2-1- Mise en œuvre.....	05
1-2-2 Domaines d'emploi.....	06
1-2-3 Impacts Socio-économiques.....	07
1.3 Matériaux constituant un BAP.....	09
1.3.1 Liant	09
1.3.2 Super-plastifiants	09
1.3.3- Agent de cohésion	11
1.3.4- Fines (aditions minérales)	11
1.3.5- Sable	13
1.3.6- Gros granulats	14
1.4 La formulation des bétons autoplaçants	15
1.5 Méthodes de formulation	16
1.5.1- Optimisation du mortier	16
1.5.2- Optimisation de la quantité de pâte	18
1.5.3- Optimisation du squelette	18
1.5.4- Méthode basée sur un plan d'expérience	18
1.6 Caractérisation à l'état frais	19
1.6.1 Le remplissage	19

1.6.2 La résistance à la ségrégation	20
1.6.3 La capacité de passage	21
1.6.4 Cure et entretien du BAP.....	21
1.7 Propriétés du BAP durci	23
1.7.1 Propriétés mécaniques.....	23
1.7.1.1- Résistance à la compression	23
1.7.1.2 Résistance à la traction	25
1.7.1.3. Module d'élasticité (en compression).....	25
1.7.2 Le Retrait	27
1.7.2.1 Retrait chimique.....	27
1.7.2.2 - Retrait plastique	28
1.7.2.3 - Retrait d'auto-dessiccation.....	29
1.7.2.4 - Retrait endogène	29
1.7.2.5 - Retrait de dessiccation (séchage)	31
1.7.2.6- Retrait thermique	31
1.8. Conclusion.....	32
CHAPITRE 2	
Matériaux utilisés et Essais Réalisés	
2.1. Introduction.....	34
2.2 Identification des matériaux.....	34
2.2.1 Caractérisation du ciment.....	34
2. 2.2. Granulats.....	34
2.2.3 Eau de gâchage	35
2.2.4. Caractérisation des granulats.....	35
2.2.3.1 Gravier.....	35
2.2.3.2. Sable.....	36
2.2.5 Adjuvant	37
2.2.6. Filler de marbre.....	37
2.3. Formulation.....	39
2.3.1. Formulation du Mortier (MAP)	40

2.3.1.1. Rapport Eau/Liant (E/L)	40
2.3.1.2. Rapport Sable/Mortier (S/M)	41
2.3.1.3. Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)	41
2.3.1.4. Confection des mortiers	41
2.3.2. Formulation du BAP	43
2.3.2.1 Confection des bétons autoplaçants	44
2.4. Méthodes d'essais	45
2.4.1. Essais sur mortier	45
2.4.1.1. Essais sur mortier à l'état frais	45
2.4.2. Essais sur BAP	46
2.4.2.1. Essais sur BAP à l'état frais	46
2.4.2.2. Essais sur BAP à l'état durci	51
2.5. Conclusion	54
CHAPITRE 3	
<u>Résultats et discussions</u>	
3.1 Introduction	56
3.2 Résultats et interprétation du BAP à l'état frais	56
3.3 Conditions de cure	56
3.4 Résultats et interprétation résistance à la compression –RC	57
3.5 Résultats et interprétation auscultation ultra-sonique –UPV	58
3.6 . Résultats et interprétation corrélation UPV/RC	60
3.6.1 Classements qualitatifs	61
3.7 Conclusion Générale	63
3.8 Perspectives	64
Référence	66

LISTE TABLEAU	
CHAPITRE 1	
Tableau1.1 Resultat du Retrait chimique Le Chatelier	28
CHAPITRE 2	
Tableau 2.1 Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé	34
Tableau 2.2 : Analyse Granulométrique du Gravier 3/8 et 8/15	35
Tableau 2.3 : Caractéristique physique des Gravier 3/8 et 8/15	35
Tableau 2.4 : Analyse Granulométrique de Sable 0/5	36
Tableau 2.5 : Caractéristiques physiques du sable 0/5	36
Tableau 2.6 Composition chimique et minéralogique du filler de marbre utilisé	38
Tableau 2.7 : Formulation de BAP pour 1 m ³	44
Tableau 2.8. Classes des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation	48
CHAPITRE 3	
Tableau 3.1 : Résultat d'essai d'étalement (<i>Propriétés des BAP à l'état frais</i>)	56
Tableau 3.2 : Résultats d'essais de compression à 03 jours	57
Tableau 3.3 : Résultats d'essais de compression à 07 jours	58
Tableau 3.4 Résultat d'essai ultrasonique à 03 jours	59
Tableau 3.5 Résultat d'essai ultrasonique à 07 jours	59

LISTE FIGURE	
CHAPITRE 1	
Figure 1.1. Action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment.....	10
Figure 1.2. Influence de la quantité du super-plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton.....	10
Figure 1.3. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV (REF) Correspondant.....	24
Figure 1.4. Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BA.....	24
Figure 1.5. Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales.....	26
Figure 1. 6. Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation	26
Figure.1.7. Diffèrent types de retrait.....	27
Figure1.8. Illustration des différentes étapes du retrait chimique lors de l'hydratation du béton.....	30
Figure 1.9. Distinction graphique entre le retrait endogène et le retrait chimique d'après(BEDARD)	30
CHAPITRE 2	
Figure 2.1 les courbes granulométriques du sable 0/5 ; gravier 3/8 et 8/15.....	37
Figure 2.2. Diagramme de diffraction X du filler de marbre été établie en mars 2017, à la cimenterie de Hammam Dhalaa (LAFARGE).....	39
Figure 2.3. Organigramme des essais réalisés sur mortiers autoplaçants à l'état frais.	42
Figure 2.4. Essai d'étalement au mini-cône : (a) exécution de l'essai, (b) mesure de l'étalement.....	42
Figure 2.5. Mini cône pour mortier.....	45

Figure 2.6. L'Entonnoir en V pour Mortier.....	46
Figure 2.7. Cône d'Abrams.....	47
Figure 2.8 : Plaque métallique et cône d'Abram (Slump Flow centrée).....	47
Figure 2.9. Essai d'étalement.....	48
Figure 2.10 : Essai de l'entonnoir en V.....	49
Figure 2.11. boîte en L (L-box).....	50
Figure 2.12. Essai de la stabilité au tamis.....	50
Figure 2.13 Appareil d'essai ultrasonique la Punditlab+.....	51
Figure 2.14 a) contrôle d'étalonnage , b) essai ultrasonique sur éprouvette ,.....	52
Figure 2.15 : Conservation des éprouvettes : a) dans l'eau, b) à l'air , c) sous film plastique	53
Figure 2.16 : Essai de compression: a) Presse à béton , b) pesage des éprouvettes, c) Affichage de résultat d'essai d) texture du BAP après écrasement.....	54
CHAPITRE 3	
Figure 3.1 Effet de la durée et du mode de cure sur la résistance à la compression....	58
Figure 3.2 Effet de la durée et du mode de cure sur la vitesse d'impulsion ultrasonique.....	60
Figure 3.3: Courbe RILEM.....	60

Introduction générale

Introduction Générale

L'Algérie a connu un développement rapide dans le domaine de la construction, ce secteur est mesuré aujourd'hui à deux exigences a priori contradictoires qui sont l'amélioration de la qualité d'un part et la réduction des couts d'autre part. Les bétons standard ont des propriétés et des caractéristiques limitées, et parfois insuffisantes pour la réalisation d'ouvrages particuliers surtout dans un climat algérien qui se distingue par la différence de la température qui arrive a plus de 40°C en été ; et des températures négatives en période d'hiver. L'élévation de la température au cours de mise en œuvre influence significativement la maturation du béton et par conséquent le comportement des bétons, essentiellement les propriétés mécaniques et physiques au court terme. D'autre part peu de travaux dans la littérature qui traite l'influence de la température et de l'humidité sur le comportement des BAP

Les conditions climatiques lors de la mise en œuvre ont une grande influence sur la qualité finale du béton. Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures élevées et aux bases humidité dès la préparation du béton, puis, pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité.

En règle générale, dès que la température mesurée sur chantier est durablement supérieure à 25 °C, des dispositions sont à prendre dans le programme de bétonnage, elles sont plus contraignantes encore, au-dessus de 35 °C. Cette protection doit être maintenue en place durant les premières heures voire quelques jours selon l'évolution des conditions climatiques. La qualité et la durée de vie du béton se jouent aux tous premiers âges, période où il est particulièrement sensible. Les précautions prises pour bétonner par temps chaud et sec peuvent générer des coûts supplémentaires qui, de toute façon, seront moindres que ceux liés aux réparations ultérieures.

Objectifs

le présent mémoire s'inscrit dans ce contexte et a pour objectifs de contribuer à l'étude de l'influence du mode de conservation (immersion, à plein air, film plastique) sur l'évolution des propriétés physico-mécaniques d'un BAP. Notre choix s'est porté sur un BAP avec la poudre de marbre en s'appuyant sur la base de données expérimentale construite dans ce travail. Initialement les essais prévues dans la présente mémoire et qui sont conformes a ceux de l'AFGC caractérisent les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais sont :

- Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams)
- Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L)
- Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis)
- les essais physiques (Retrait , Absorption , porosité , perméabilité)

Mais suite aux restriction sanitaire à cause de la pandémie du covid19 et vue la non possibilité de l'accès au laboratoire de génie civil de l'université, nous nous somme limités aux essais suivant :

1-Essais sur BAP à l'état frais :

- l'essai d'étalement au cône d'Abrams

2-Essais sur BAP à l'état durci :

-Essais non destructifs (essai ultrasonique)

-Résistance à la compression au jeune âge.

Ces essais ont été effectués à l'extérieur dans un laboratoire privé LACOTECH .

Plan du mémoire

Ce mémoire est organisé en 3 chapitres : Le premier chapitre consiste en une synthèse bibliographique présentant l'état de l'art des différents travaux nationaux et internationaux relatifs aux BAP avec additions et leurs propriétés mécaniques, retrait, absorption. Il permet de faire le point sur les acquis et les lacunes de la littérature, des lacunes auxquelles nous essayerons de répondre totalement ou partiellement. Ce chapitre pose donc les bases du travail qui va être ensuite développé dans le mémoire. Cette synthèse bibliographique est composée de trois parties. La première partie traite des généralités sur les bétons autoplaçants et leurs constituants comme les ciments, les additions minérales, les adjuvants. La seconde partie traite du retrait de ces bétons ainsi qu'une synthèse des modèles d'ingénierie pour la prédiction de ce phénomène. La troisième partie traite des propriétés mécaniques . Le second chapitre décrit la démarche expérimentale, les matériaux utilisés ainsi que les méthodes d'essai. Il présente la formulation de BAP étudié. La formulation de référence à base de ciment portland classique CEM I42.5 avec 10% de poudre de marbre. Le rapport E/L est gardé constant égale à 0.40 et la quantité de pâte égale à 463.75kg/m³. Dans ce chapitre, sont décrits les méthodes d'essai qui nous ont permis de mesurer plusieurs grandeurs physico- - mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité, retrait libre dans les conditions endogènes et en dessiccation au jeune âge, porosité accessible à l'eau, absorption capillaire, perméabilité. Dans le troisième chapitre, on s'intéresse aussi résultats obtenus avec interprétation, comparaison, et conclusion

Enfin, une conclusion générale ainsi que des perspectives clôturent ce mémoire.

CHAPITRE 1

Etude bibliographique

1-1 INTRODUCTION

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. Il est utilisé pour sa simplicité de fabrication, sa mise en place, son faible prix de revient, par sa performance mécanique et sa durabilité, utilisé pour divers ouvrages, notamment les bâtiments, les ponts, les barrages, des centrales thermiques et nucléaires ...etc. A partir des années (1970-1980) des améliorations avancées ont été réalisées pour permettre une amélioration de ces constituants granulaires et ses propriétés existantes, en particulier des bétons à haute performance (BHP) et des bétons à très haute performance (BTHP). L'idée de développement d'un béton très fluide capable de se compacter sous son propre poids et sans vibration extérieure, qui ne nécessite pas lors de sa mise en place des systèmes de vibration, et moyens de serrage, a été lancée en premier lieu par des chercheurs de l'université de TOKYO vers 1980[1]. Leur objectif était de supprimer la ségrégation du béton et les opérations coûteuses liées à la vibration afin d'accroître la productivité des chantiers. Ces bétons sont connus sous la dénomination (BAP) : bétons Auto-plaçant ou bétons Auto-nivelant selon leurs applications.

Les bétons Auto-plaçants constituent une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures face à une main-d'œuvre de moins en moins qualifiée. Cette gamme de béton se caractérise par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en étant stable et garantissant des structures durables. Ces bétons peuvent être mis en place sans vibration, au travers de zones confinées seulement sous l'effet de la gravité, tout en développant une bonne compacité sans exiger une main-d'œuvre spécialisée durant la consolidation. Ces propriétés contribuent à assurer un béton durable de qualité. Selon la densité du ferrailage et la complexité des éléments structuraux, le besoin de vibration peut diminuer considérablement et même être éliminé, ce qui représente une économie de main-d'œuvre considérable.

Les principaux avantages des BAP sont liés à leur mise en place qui ne nécessite l'apport d'aucune vibration, qu'elle soit interne ou externe. Ces avantages sont d'ordre technico-économiques mais également social. Ainsi, l'absence de vibration des BAP engendre une diminution sensible des nuisances sonores ainsi que de la pénibilité du travail et une réduction des délais et des coûts globaux de production. Sa fluidité permet également de couler des milieux fortement ferrillés ou à géométrie complexe. Cette mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité du matériau mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés

contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiants et de fines ou l'emploi d'un agent de viscosité

1-2 Intérêts techniques des BAP

La mise en œuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir-faire particulier. La solution proposée a été d'utiliser un matériau très fluide, capable de se mettre en place et de se compacter sous son propre poids, sans vibration extérieure. Ces matériaux initialement appelés bétons Hautes Performances, sont aujourd'hui connus sous le nom de bétons Auto-plaçant bétons Auto-compactant, ou bétons Auto-nivelant, selon les applications [2]

1-2-1 Mise en œuvre

La principale différence, entre un BAP et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. La spécificité d'un BAP est d'être extrêmement fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mis en place. Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale. En termes de mise en œuvre, les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Un des avantages majeurs des BAP, que nous aborderons également dans la partie traitant de leur impact économique, est la réduction de la durée de la phase de coulage : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement du matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure est plus facile à réaliser.

La méthode traditionnelle de remplissage par le haut du coffrage peut être utilisée avec une hauteur de chute plus importante. Il convient cependant de la limiter à 5m, pour éviter des problèmes de ségrégation dus à la chute du béton dans le coffrage. L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau. La fluidité des BAP permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux.

D'après les recommandations de l'AFGC, quel que soit le mode de remplissage retenu, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages. Une perte d'homogénéité peut en effet se manifester lorsque ce cheminement est trop important. Ainsi, la longueur de cheminement maximale préconisée est de 10 m. (Dans certains cas, elle peut être limitée à 5 m). Toujours d'après les recommandations provisoires de l'AFGC[3], les données relatives à la poussée exercée par le béton frais sur le coffrage ne sont pas suffisantes

pour fixer des règles précises sur ce point. Différentes études ont été menées depuis sur le sujet.

M Daimon[4]déclare que lorsque les BAP ont été développés, il était généralement admis qu'ils génèreraient une pression hydrostatique. Or différentes études ont montré que la pression exercée par les BAP sur les coffrages était plus faible que celle attendue, et dépendait de la vitesse de remplissage du coffrage .[4, 5]Ceci proviendrait du caractère thixotrope du matériau, c'est à dire de sa capacité de structuration au repos[6].

La pression exercée par le BAP sur le coffrage dépendrait non seulement de la vitesse à laquelle il est mis en place mais également du mode de remplissage choisi. Lorsque le remplissage est effectué rapidement ou lorsqu'il est effectué en pied décoffrage, la pression latérale exercée sur le coffrage serait de l'ordre de la pression hydrostatique car le matériau n'a pas le temps de se structurer. En revanche, un remplissage plus lent et effectué par le haut du coffrage permet au matériau de se structurer[6].La mise en œuvre d'un BAP est plus simple que celle d'un béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Certaines précautions supplémentaires sont à prendre, lors de la préparation des coffrages par exemple (propreté, étanchéité...), mais globalement les consignes restent similaires à celles définies pour les bétons traditionnels.

1-2-2 Domaines d'emploi

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- ✓ possibilité de coulage de zones fortement ferraillées ;
- ✓ possibilité de coulage de zones d'architecture complexe ;
- ✓ obtention de très bonnes qualités de parement.

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrant utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables. Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en œuvre évoquées précédemment sont respectées, notamment du point de vue de la propreté des coffrages.

Le coulage d'un béton dans une zone très fortement ferraillée menait traditionnellement à un surdimensionnement de la pièce afin de rendre accessible tout point du bétonnage. L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe. Les BAP constituent donc une

alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc.

Ó. H. Wallevik [7] précise cependant que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site car les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes.

En effet, la formulation des BAP est particulière : utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite donc la mise en place d'un suivi plus important. Nous verrons que les différentes précautions à prendre sur chantier et que la composition même du matériau peuvent entraîner un surcoût. Les chantiers, où la solution BAP a été retenue, montrent l'intérêt de ces bétons. Les motivations de ce choix les plus couramment rencontrées sont la facilité de mise en œuvre, la réduction des délais et la qualité des parements. On peut citer quelques ouvrages réalisés en BAP[8] :

- Le pont suspendu Akashi Kaikyo au Japon où le BAP contenant un filler a été utilisé pour le massif d'ancrage du plus long pont suspendu au monde (3910 m). Le volume de BAP utilisé est 380 000 m³. Grâce à l'utilisation du BAP, il a été possible de couler une quantité de béton 1900 m³/ jour. La densité de ferrailage et la présence de nombreuses installations temporaires a été de 20%
- Le bâtiment Landmark Tower où un BAP d'excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur ;
- Le pont Kiba Park où 650 m³ de béton Auto-plaçant possédant une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPA ont été utilisées.

1-2-3 Impacts Socio-économiques

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- ✓ une diminution du bruit sur site ;
- ✓ une diminution de la pénibilité des tâches ;
- ✓ une réduction des risques d'accident.

En effet, le bruit engendré pendant la phase de vibration est particulièrement désagréable puisqu'il est d'une intensité élevée sur des périodes relativement longues. Dans le cas des usines de préfabrication, où la réverbération du bruit sur les parois peut augmenter le niveau sonore de manière très importante, toutes les personnes présentes dans l'atelier sont concernées par la réduction du niveau sonore ambiant. Cette réduction des nuisances sonores peut éventuellement permettre une meilleure implantation des usines dans leur environnement, puisqu'il est plus facile de respecter les réglementations en matière d'insonorisation.

Dans le cas d'un chantier, ce sont principalement les personnes chargées de la mise en place et de la vibration qui bénéficient de la réduction du bruit, mais également les riverains lorsqu'il s'agit d'un site urbain. Malgré l'utilisation de procédés de construction de plus en plus mécanisés, les efforts physiques auxquels sont soumis les ouvriers restent pénibles. Avec l'apparition des BAP, les opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfacage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un débullage dans le cas des applications horizontales. Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers trappes et échelles, sont réduits de manière significative. De plus, le fait de vibrer le béton peut avoir de graves répercussions sur la santé. Par ailleurs, les BAP sont mis en place par des opérations simplifiées donc par des agents plus rapidement formés. Ils peuvent donc se concentrer sur la préparation des coffrages sans avoir à assimiler ou mettre en pratique les recommandations sur la vibration. Mais compte tenu des objectifs exigeants des BAP, les techniciens du béton (formulateurs, agents de laboratoires et responsables de chantier) sont plus sollicités sur leurs connaissances des matériaux. Ils doivent donc se familiariser avec ces nouvelles formules de béton, les constituants utilisés, mais aussi avec les matériels et procédures nécessaires à leur préparation[9].

L'utilisation d'un BAP peut s'avérer plus économique que celle d'un béton ordinaire, et ce malgré un surcoût de formulation. Ce surcoût est principalement lié à l'adjuvantation puisque la fluidité doit être instantanée, mais également se maintenir dans le temps, dans le cas où les lieux de fabrication et de coulage ne seraient pas les mêmes. Cependant, ces frais supplémentaires peuvent rapidement être compensés par la diminution des coûts de main d'œuvre (réduction du nombre d'intervenants pendant la mise en place du béton), du temps de coulage, des délais de fabrication, etc.

Les BAP montrent en effet tout leur potentiel lorsque le chantier est considéré dans son ensemble, frais direct et indirect, donc «l'approche globale» suggéré Mindeguia [10] Même si l'utilisation des BAP nécessite certaines précautions en matière de formulation ou de

préparation du matériel, l'évaluation de leurs avantages techniques mais également socioéconomiques montre que ces bétons devraient être de plus en plus utilisés à l'avenir.

1-3 Matériaux constituant un BAP

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement des états (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chimique et morphologique. Ainsi, nous allons décrire, dans cette partie, les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton Auto-plaçant (ciment, agrégats, eau, ajouts minéraux et adjuvants), et les paramètres influents.

Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. Les différents constituants proposées pour composer les bétons Auto-plaçants, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, sont : les granulats, les fines, le super-plastifiant et parfois l'agent de viscosité. Les nombreux constituants des rendent leur dosage complexe. Tous les constituants d'un béton créent des interactions complexes. La variabilité des matériaux et des dosages, particulièrement du sable et du super-plastifiant, peuvent facilement affecter les propriétés et causer des problèmes lors de la production des BAP. C'est pourquoi ces bétons spéciaux nécessitent une bonne analyse de ses propriétés à l'état frais et durci.

1-3-1 Liant :

Les BAP nécessitent un dosage plus élevé par rapport aux bétons conventionnels. Le ciment peut être remplacé par des ajouts. Les raisons sont nombreuses : diminution du prix, meilleur contrôle de la température d'hydratation, contrôle du retrait, meilleure compacité du mélange de béton.

1-3-2- Super-plastifiants :

L'apparition des bétons Auto-plaçant et des bétons à Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des super-plastifiants.[11, 12]. L'action principale des super-plastifiants est de défloculer 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 chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floes 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[13].

L'ajout d'un super-plastifiant aide à augmenter la fluidité. La figure 1.2 montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en super-plastifiant [14].

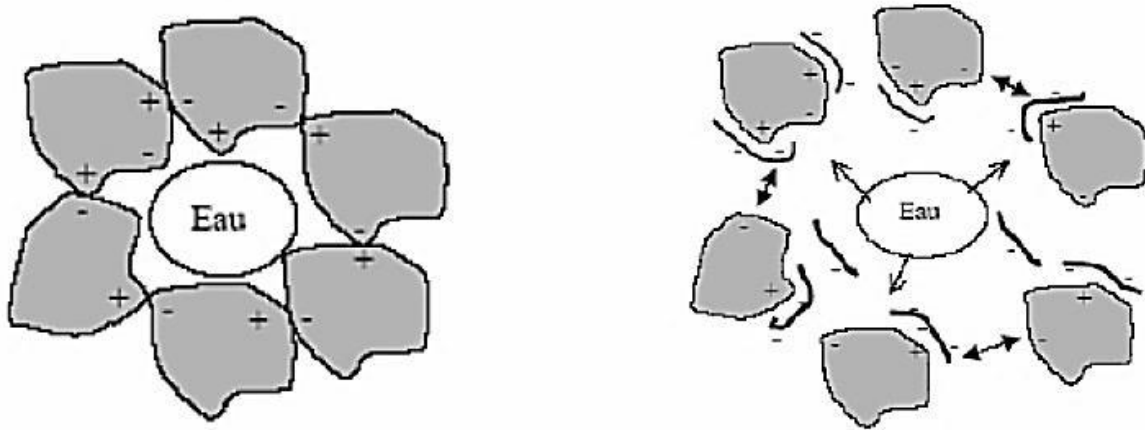


Figure 1.1. Action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment[15]

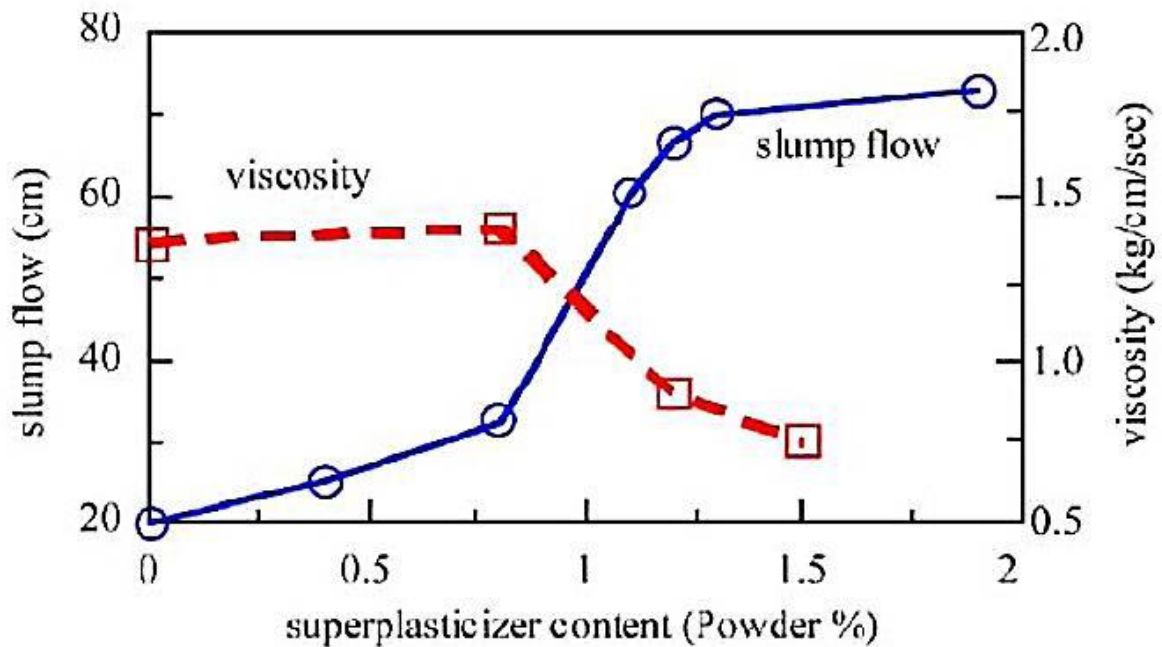


Figure 1.2. Influence de la quantité du super-plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [14]

Flatt et Houst[16] définissent l'action des super-plastifiants en trois mécanismes :

- ✓ Une partie est adsorbée ;
- ✓ Une partie est consommée par les réactions avec les hydrates ;
- ✓ Une partie, en excès, reste en solution.

Sugamata et al. [17] ont étudié l'influence de différents super-plastifiants et de leurs dosages sur le maintien rhéologique dans le temps d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage de super-plastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur. Cette caractéristique 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. Actuellement, les super-plastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation. Différents auteurs [18, 19] ont montré que le moment d'introduction du super-plastifiant lors du malaxage joue un rôle sur le dosage à saturation. Si l'introduction est retardée, le dosage à saturation est plus faible, il est obtenu pour une plus faible quantité de super-plastifiant. Ceci est en accord avec ce que nous avons vu, car si l'hydratation du ciment est amorcée alors la consommation du super-plastifiant par les hydrates sera moins importante [11]. Ainsi, le fait de retarder son introduction, permet au super-plastifiant d'être plus efficace et d'obtenir des mélanges plus fluides que s'il avait été introduit en début de malaxage.

1.3.3- Agent de cohésion :

Ce sont généralement des dérivés celluloseux, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. De façon schématique, l'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapport eau/fines élevés, car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Ils peuvent s'avérer superflus dans le cas de BAP ayant des rapports eau/fines faibles (notamment BAP de résistance supérieure à 50 MPA).

Pour la gamme intermédiaire des bétons, leur utilité est à étudier au cas par cas. Les agents de cohésion ont la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis du problème de ressuage et de la ségrégation [20, 21]. Par contre, leur utilisation peut conduire suivant les produits à des problèmes de dosage en centrale (dosage faible), à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [22].

1.3.4- Fines (additions minérales) :

Les super-plastifiants permettent donc d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Leur utilisation n'est pas suffisante dans le cas des BAP. Nous avons vu que la fluidité de la pâte avait une certaine influence sur le comportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis la fluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains doivent aussi être réduites. Pour augmenter la quantité de pâte d'un BAP, on peut alors

envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire. Ces matériaux peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leur nature[23].

a. Les fumées de silice :

L'influence des fumées de silice n'est pas très claire. Pour certains auteurs[24, 25], les fumées de silice augmentent le seuil de viscosité en augmentant la compacité des mélanges. Par contre, pour Carlsward et al.[26], les fumées de silice ne modifient pas la viscosité. Par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence, B. Felekoğlu, et al.[27] Montrent que l'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en super-plastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou pour des bétons.

b. Les fillers calcaires :

Zhu et Gibbs [28] ont étudié l'influence de différents types de filler calcaire. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisé ne semble pas avoir d'influence sur l'étalement. Par contre, si on s'intéresse au béton, ils montrent que le type de filler a une forte incidence sur la quantité de super-plastifiant pour un étalement donné. En effet, le filler à base de craie demande plus d'adjuvantation que le filler calcaire. La différence intervient dans la présence d'impuretés, la compacité et le processus d'absorption. Malgré cela, quel que soit le type de filler utilisé, leurs résultats montrent que plus il y a de filler en remplacement du ciment, moins il faut de super-plastifiants pour atteindre un étalement donné.

c. Les cendres volantes :

Le remplacement d'une partie du ciment par des cendres volantes a une faible influence sur le seuil et la viscosité des pâtes de ciment [24] Certains auteurs remarquent cependant que leur utilisation peut améliorer la fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. Ferraris et al.[29] Montrent par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines. Associées à un super-plastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité, mais le rapport E/C doit être suffisamment important (équivalent au rapport utilisé pour l'échantillon témoin) sinon la demande en adjuvant augmente fortement.

d. Le quartz :

Le quartz est un minéral composé de dioxyde de silicium (SiO_2), composant important du granite dont il remplit les espaces résiduels et des roches métamorphiques granitiques (gneiss, quartzite) et sédimentaires (sable, grès). Le quartz est généralement chimiquement quasi-inerte du fait de sa structure cristallisée, mais un broyage très fin peut le rendre pouzzolanique et le rendre ainsi actif. Cette réaction complexe de dissolution-précipitation dépend de la taille des particules de quartz [30].

e. Les laitiers de hauts fourneaux :

Les laitiers de hauts fourneaux sont des résidus minéraux de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Ils contiennent de la chaux (45 à 50%), de la silice (25 à 30%), de l'alumine (15 à 20%) et environ 10% de magnésie. Trempé à l'air ou à l'eau, le laitier est principalement vitreux. Il est broyé et ajouté en proportions variables au clinker. Le laitier peut non seulement améliorer les propriétés rhéologiques mais aussi augmenter significativement les performances mécaniques et la durabilité à long terme du béton.

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. Shi et al.[31] Montrent par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le super-plastifiant. Il est donc possible que la demande en super-plastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil.

f. La pouzzolane naturelle :

La pouzzolane naturelle est un matériau d'origine volcanique. Krachai et al.[32] Ont étudié l'influence de la pouzzolane naturelle sur les performances mécaniques des BAP. Ces auteurs ont montré que 15% de teneur en pouzzolane naturelle engendre une augmentation importante des résistances mécaniques après 28 jours.

1.3.5- Sable :

Un sable avec une bonne distribution granulométrique et un faible coefficient d'absorption d'eau convient parfaitement à la fabrication du BAP de bonne qualité. Les sables roulés sont préférables par rapport aux sables concassés. En effet, l'utilisation des sables dans la BAP dépend de leur disponibilité locale[7] Le type du sable et son module de finesse ont un effet important sur les propriétés des bétons. Kim et al[33]. Ont étudié l'influence de type du sable et son module de finesse sur les propriétés à l'état frais des mortiers. ils ont rapporté que l'utilisation du sable moyen avec un module de finesse de 2.4 – 2.9, donne une meilleure performance rhéologique du BAP en termes d'étalement, Sudo et al[34] ont utilisé l'essai de la

boîte en L pour comparer des BAP avec des sables de différentes granulométries. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour les BAP contenant du sable de granulométrie moyenne.

Les auteurs ont conclu, que l'utilisation du sable roulé moyen de module de finesse (2.4 – 2.9) est recommandée pour la fabrication du BAP de bonne qualité à l'état frais. Cependant, cette qualité diminue lorsqu'on utilise du sable concassé et sable grossier Edamatsu et al.[35] ont trouvé que la capacité de remplissage des BAP diminue si on utilise un volume du sable supérieur à 50 % dans la composition du BAP. Cependant, Chai [38] a suggéré que la teneur en sable doit être comprise entre 40 à 47 % pour obtenir un BAP.

1.3.6- Gros granulats :

Les gros granulats sont un facteur très important pour la formulation des BAP. La quantité, la granulométrie, la forme, la porosité et les caractéristiques pétrographiques des gros granulats sont à considérer lors de la formulation d'un BAP. Le choix des granulats roulés ou concassés dépend de la disponibilité locale des matériaux[36] Des granulats légers et recyclés ont également été utilisés pour la fabrication des BAP[37, 38]. La taille maximale des gros granulats est un facteur non négligeable et peut provoquer le blocage du BAP. Le risque de blocage, pour un ferrailage donné, augmente lorsque le diamètre des granulats augmente[39]. La plupart des applications des BAP ont utilisé des gros granulats avec un diamètre maximal de 16 à 20 mm. Okamura and Ouchi [2] ont rapporté que la diminution de la capacité de remplissage est due à l'augmentation de la quantité des gros granulats dans le béton.

Dans les travaux de Yammine et al.[40], il a été montré aussi que la fraction volumique granulaire (G+S) a une influence sur la fluidité des BAP. En fait, pour une fraction volumique granulaire inférieure à environ 62%, le BAP reste dans les limites de fluidité exigée, car son étalement au cône d'Abrams et son écoulement à la boîte LCPC seront supérieurs à 550 mm; ce qui correspond à une capacité de passage inférieure à 0.8, limite recommandée par l'AFGC (mesurée par la boîte en L).

L'effet du rapport G/S sur la résistance mécanique à la compression, qu'elle diminue en fonction de la diminution du rapport G/S[40]. Parallèlement à une diminution du volume des gros granulats, la granularité des grains (distribution granulaire) influence fortement l'ouvrabilité du BAP. La combinaison de plusieurs granulats ayant des granularités différentes permet d'améliorer la compacité du mélange et d'obtenir une granularité continue. Cela a pour conséquence de favoriser la stabilité du BAP vis-à-vis du phénomène de ségrégation tout en améliorant sa fluidité.

1.4 La formulation des bétons autoplaçants :

En général, le liant est composé d'un ciment Portland seul ou d'un ciment Portland mélangé avec des ajouts minéraux. Dans notre pays, plusieurs recherches ont été menées sur les ciments et les nouveaux ajouts minéraux tels que la poudre de marbre, le metakaolin, la bentonite calcinée, la poudre de brique, et les résultats obtenus ont montré la faisabilité de leur incorporation en mélange binaire, ternaire voir quaternaire. Notons qu'il est possible d'incorporer les additions minérales au sein de la cimenterie dans le cru du ciment pour corriger la composition du cru (ex. : utilisation des cendres volantes comme source d'alumine) ou par mélange avec le clinker (additions au ciment) ou de les ajouter au moment de malaxage, c.-à-d. dans le malaxeur pour le cas d'une centrale à béton (additions au béton) en remplaçant une partie du ciment ordinaire.

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. La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais; il faut réaliser, en plus de l'essai au cône, l'essai à la boîte en Let l'essai de stabilité au tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation.

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 de VM Matériaux, est l'industrie du bâtiment, qui utilise 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, justement 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 formulateur :

- ✓ 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 (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 formulateurs sont certes développés leur propre outil. Ce 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 (nous le voyons au chapitre suivant : la granulométrie n'est pas suffisante pour décrire un empilement, puisque la forme des grains est un facteur tout aussi essentiel). Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

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 ; par 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.

1.5 Méthodes de formulation :

1.5.1- Optimisation du mortier :

Okamura et Ozawa[41] sont les précurseurs en matière de formulation des BAP. Les caractéristiques requises sont une capacité de déformation élevée de la pâte et du mortier, ainsi qu'une résistance à la ségrégation lors de l'écoulement en milieu confiné.

Leur méthode de formulation se base sur les critères suivants[1, 42] :

- ✓ Une quantité de gravillons limitée ;
- ✓ Un rapport eau/poudre faible ;
- ✓ Utilisation d'un super-plastifiant.

Les quantités de gravillons et de sable sont fixées de manière à obtenir facilement les caractéristiques des BAP en n'ajustant que le rapport eau/poudre et le dosage en super-plastifiant. Ainsi, la quantité de gravillons est limitée à 50% de leur compacité

(qui est le rapport entre le volume de grains sur le volume total du système grains + vides) afin de minimiser les risques de blocage. Il semblerait que ce rapport soit sécuritaire[43, 44]

. La quantité de sable est par ailleurs limitée à 40% du volume du mortier. Les propriétés de la pâte (rapport eau/poudre et quantité de super-plastifiant) sont ensuite optimisées et caractérisées à l'aide d'essais sur mortiers. Un étalement relatif (Γ_m) est déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et une vitesse d'écoulement relative (R_m) est déterminée par un essai au V-funnel pour mortier :

$$(\Gamma_m) = (D_2 - d_2)/d_2 \quad (1.1)$$

$$(R_m) = 10/t \quad (1.2)$$

D est le diamètre de la galette de mortier ;

d est le diamètre inférieur du cône ;

t est le temps d'écoulement du mortier.

Les auteurs ont montré qu'il existait une relation linéaire entre Γ_m et R_m pour un dosage en super-plastifiant donné et quand le rapport eau/poudre varie. Pour formuler un BAP acceptable, il faut obtenir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1$ [44, 45]. Edamatsu et al. [61] proposent une méthode pour évaluer les interactions entre le sable ou les poudres du mortier et les gros granulats. Ils montrent qu'en faisant varier les paramètres Γ_m et R_m dans une certaine gamme, le rapport R_{mb}/R_m est constant. R_{mb} est la vitesse d'écoulement relative du béton modèle composé du mortier étudié ainsi que 20% de billes de verre de 10 mm de diamètre. A partir de ce rapport, les auteurs déclarent qu'il est possible d'évaluer les interactions entre les gravillons et les particules du mortier (sable ou poudre).

A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al.[46] 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 [6] et Jacobs et Hunkeler[47] montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

1.5.2- Optimisation de la quantité 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. [48] 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. Oh et al.[48] ont obtenus 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[49, 50]. 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 Basuyaux[51] dans une méthode de formulation des bétons de sable.

1.5.3- Optimisation du squelette :

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons[52]. 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. Sedran[44] a 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[53], qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton. Ses auteurs proposent un cahier des charge spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton. Roshavelov[54] a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique.

1.5.4- Méthode basée sur un plan d'expérience :

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressant pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat et al.[55] 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].

1.6 Caractérisation à l'état frais :

Les bétons ordinaires sont des matériaux qui se mettent en place sous l'effet de sollicitations extérieures ou intérieures telles que la vibration. Les bétons Auto-plaçants de leur côté se comportent comme des fluides plus ou moins visqueux et se mettent en place sans sollicitation. De ce fait, les deux bétons se comportent de façon très différente. Sur chantier, le test d'affaissement au cône d'Abrams est très utile pour caractériser les bétons ordinaires, alors qu'il n'est utilisé que pour mesurer l'étalement de la galette d'un BAP et le temps de passage à une galette intermédiaire de 50 cm de diamètre. Or, un seul test ne suffisant pas à prédire la qualité d'un béton Autoplaçant, plusieurs tests ont été développés pour caractériser les propriétés du BAP. Les propriétés 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 tests empiriques :

- ✓ Le remplissage ;
- ✓ La résistance à la ségrégation ;
- ✓ La capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité déphasage[3, 56].

1.6.1 Le remplissage :

Le remplissage du béton est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le BAP est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids et sans vibrations. 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. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects [3], puisque le diamètre final atteint par la galette de béton correspond à la capacité de

déformation, et le temps de passage à un certain diamètre (50 cm) correspond à la vitesse de la déformation du béton.

La fluidité d'un BAP est contrôlée par l'état de contrainte existant entre les particules qui le constituent. En effet, pour que le béton s'écoule bien, il est primordial de réduire les frictions et les frottements existants entre les particules solides qui génèrent des contraintes empêchant l'écoulement. Si on considère que pendant son écoulement, le béton est un matériau diphasique, et que les granulats baignent dans une suspension fluide (phase liquide) formée de la pâte de ciment (ou du mortier), il est nécessaire d'augmenter le volume de pâte (ou diminuer le volume de granulats) pour favoriser l'écoulement du béton [57, 58].

L'utilisation de granulats roulés (de forme plus ou moins sphérique) peut aussi être avantageuse lorsqu'on désire réduire les frictions entre les granulats. Il est à noter que la réduction des frictions et frottements entre les particules fines n'est possible qu'en augmentant le volume d'eau dans le béton. Or une utilisation excessive d'eau diminue considérablement la résistance à la ségrégation, et conduit à des faibles performances mécaniques du béton à l'état durci. Par conséquent, un bon équilibre est nécessaire entre la résistance à la ségrégation du béton et la fluidité par réduction des frictions entre les granulats. Pour ce faire, il ne suffit pas seulement d'augmenter le volume de la pâte qui doit avoir en outre des propriétés Auto-plaçant. En effet, la pâte du béton doit présenter une bonne fluidité et conférer au béton une grande résistance à la ségrégation [73]. Du point de vue rhéologique, cela se traduit par un faible seuil de cisaillement, et une viscosité suffisante pour assurer le maintien des granulats dans la suspension. La fluidité de la pâte peut être assurée par l'ajout d'un super-plastifiant qui agit en baissant fortement le seuil de cisaillement de la pâte, et celui du béton si les frottements inter-granulaires sont minorés par un volume suffisant de pâte.

1.6.2 La résistance à la ségrégation :

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [56, 59]. La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

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

béton. Des matériaux de surface granulaire plus élevée, peuvent par absorption et adsorption retenir une quantité supplémentaire d'eau libre.

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. Les autres aspects de ségrégation sont évités en utilisant une pâte capable de maintenir les particules solides et l'air distribués uniformément en suspension. Ceci nécessite une forte interaction entre les phases du béton, qui correspond à des forces résultant des frictions entre les particules. Or, on ne peut pas augmenter les interactions entre les particules du béton puisque l'écoulement du béton sera fortement influencé, et les risques de blocages de gravier seront importants pendant un passage dans un milieu confiné ou encombré par les armatures. On a donc intérêt à augmenter la cohésion entre les phases, plutôt que les interactions[56].Ceci est possible avec une pâte de rapport E/C réduit, ou l'utilisation d'un agent de viscosité.

1.6.3 La capacité de passage :

Le béton Auto-plaçant doit réunir à la fois la capacité de remplissage et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement sur un chantier. Cependant, dans les milieux confinés et les zones fortement ferraillées, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué d'une part par la quantité importante de gros granulats dans le béton, et d'autre part par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. A l'approche des armatures, une différence se crée entre la vitesse des granulats et celle de la pâte. Plus rapide, la pâte précède les granulats en passant à travers les armatures[60]. 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[44]. Par conséquent, les frictions et les collisions entre les granulats sont plus importantes, et créent des 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 Auto-plaçant 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 maximale plus petite.

1.6.4 Cure et entretien du BAP

La cure du béton est la protection mise en œuvre pour éviter une dessiccation de surface du béton, pour lui assurer une maturation satisfaisante et donc favoriser son bon durcissement.

Lors du durcissement du béton, et particulièrement quand les conditions atmosphériques sont défavorables (vent, soleil, hygrométrie faible, temps sec), il convient d'éviter que l'eau du béton ne s'évapore avant d'avoir hydraté l'ensemble des grains de ciment, car après bétonnage, le béton doit conserver son eau pour que l'hydratation et la montée en résistance se développent dans de bonnes conditions.

La cure, qui est obligatoire pour tous les bétons, représente l'ensemble des précautions qu'il faut prendre pour protéger le béton entre sa mise en place jusqu'au développement d'une résistance suffisante.

Elle est essentielle pour garantir la durabilité du béton car l'absence de cure est souvent une cause de fissuration de la surface du béton.

Elle permet de protéger de la dessiccation (perturbation de l'hydratation par manque d'eau) la peau du béton au jeune âge : zone qui doit présenter une porosité minimale.

la vitesse d'évaporation de l'eau et donc de dessiccation du béton dépend de la température de l'air, de la vitesse du vent, de la température du béton, de l'humidité relative de l'air.

Elle doit être mise en œuvre le plus tôt possible après le bétonnage (dès la fin sur surfaçage et juste après décoffrage pour les surfaces coffrées et maintenue jusqu'au moment où le béton a acquis une résistance suffisante.

La cure est réalisée :

- Soit par limitation de l'évaporation
- Soit par apport d'eau à la surface du béton

Elle doit protéger le béton au jeune âge contre :

- la dessiccation provoquée par le vent, le soleil, le faible taux d'humidité de l'air ambiant...
- les températures extrêmes : chaudes et froides, et les variations de températures,
- les aléas climatiques : intempéries
- Elle permet aussi de limiter le retrait plastique

La durée minimale de cure (variable de 1 à 15 jours) est en fonction :

- De la formulation du béton
- De la cinétique de prise et de montée en résistance du béton
- De la température à la surface du béton (et non pas à l'extérieur du coffrage)
- Des conditions ambiantes : température ambiante, humidité relative, vitesse du vent, ensoleillement...

De nombreux chercheurs ont étudié l'effet de conditions de différents modes de conservation sur les propriétés et les performances du béton[61, 62]. La résistance en compression des BAP

conservées dans l'eau et enveloppé dans une feuille de plastique est supérieure à ceux conservés dans l'air quelque soit l'âge et le rapport E/L.

1.7 Propriétés du BAP durci :

Les particularités de composition des bétons Auto-plaçant conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés.

1.7.1 Propriétés mécaniques :

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition [63, 64]. Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durci, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait.

1.7.1.1- Résistance à la compression :

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [65, 66]. 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. Différentes données ont été publiées [67, 68] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes (voir Figure 1.12).

De plus, certains auteurs [69], affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler est grande (Figure 1.13). Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.

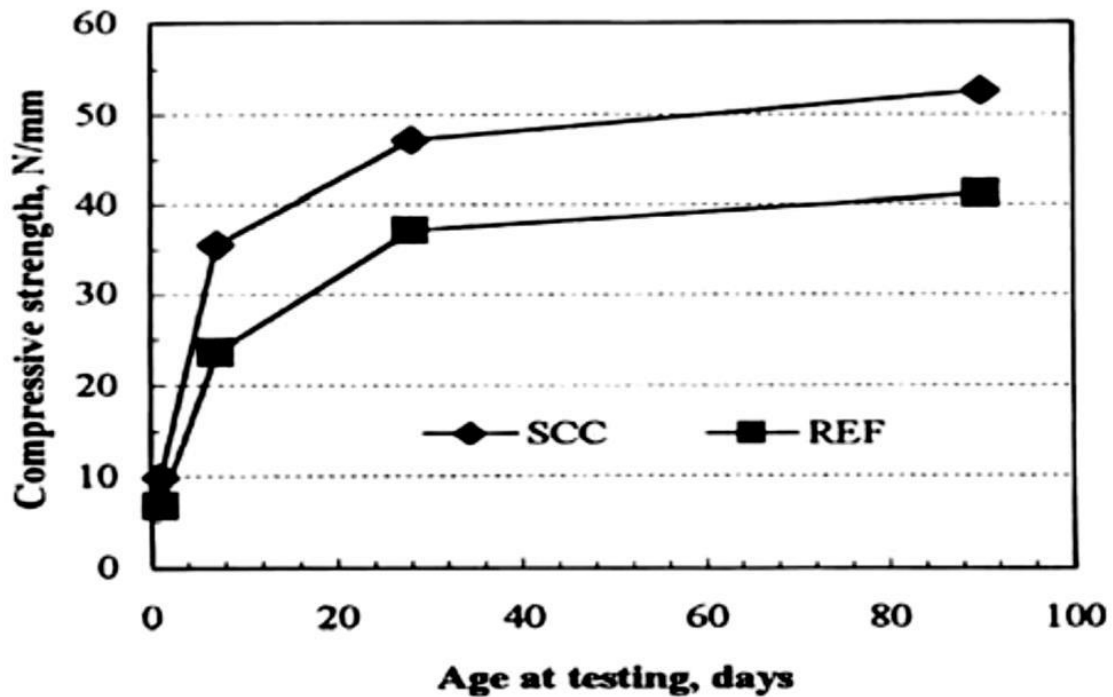


Figure 1.3. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV (REF) correspondant[67]

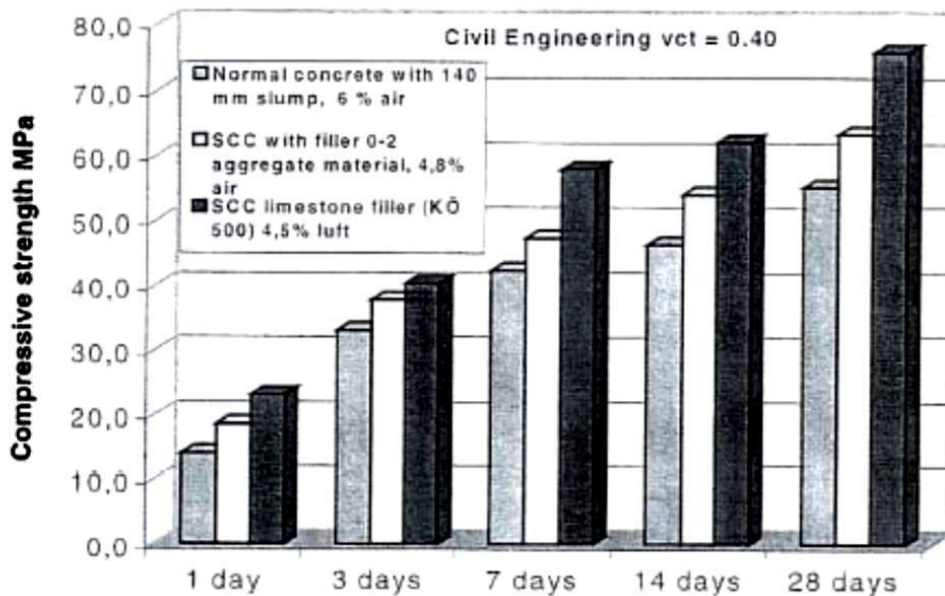


Figure 1.4. Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BA (de formulation différente) [69]

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [70]. De même, certains super-plastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des

formulation sont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique[71]. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

1.7.1.2 Résistance à la traction :

Pour une résistance à la compression donnée d'un BAP, la résistance à la traction peut être assumée à être la même que celle d'un béton ordinaire comme le volume de pâte n'a aucun effet significatif sur la résistance à la traction [72]. Selon Klug et Holschemacher[73], la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés, elle peut aller jusqu'à 40% ce qui implique qu'il y a nécessité de revoir la section minimale de ferrailage. Selon Guneyisi et Gesoglu[74] la variation de la résistance à la traction d'un béton contenant du laitier est similaire à celle d'un béton sans laitier. En général la résistance à la traction est en baisse avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange, exception est faite pour les dosages en laitier à 50 et 60% dans le cas de 90 jours de cure dans l'eau. Dans leur article sur les BAP légers à haute résistance, Choi et al.[33] ont trouvé une relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction comparable à celle donnée par les règlements de béton armé.

1.7.1.3. Module d'élasticité (en compression)

Si on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{CJ1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. Or, si ceci est vrai dans certains cas à la précision des mesures près[75, 76] (voir figure 1.14). D'autres auteurs indiquent que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés[3, 77]. Leur volume de pâte plus élevé peut expliquer ce phénomène. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPA) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats E_g (60000 à 100000 MPA). A partir d'un calcul prenant en compte le volume respectif des différentes phases (pâte, granulats), les modules résultants peuvent être comparés aux prévisions réglementaires

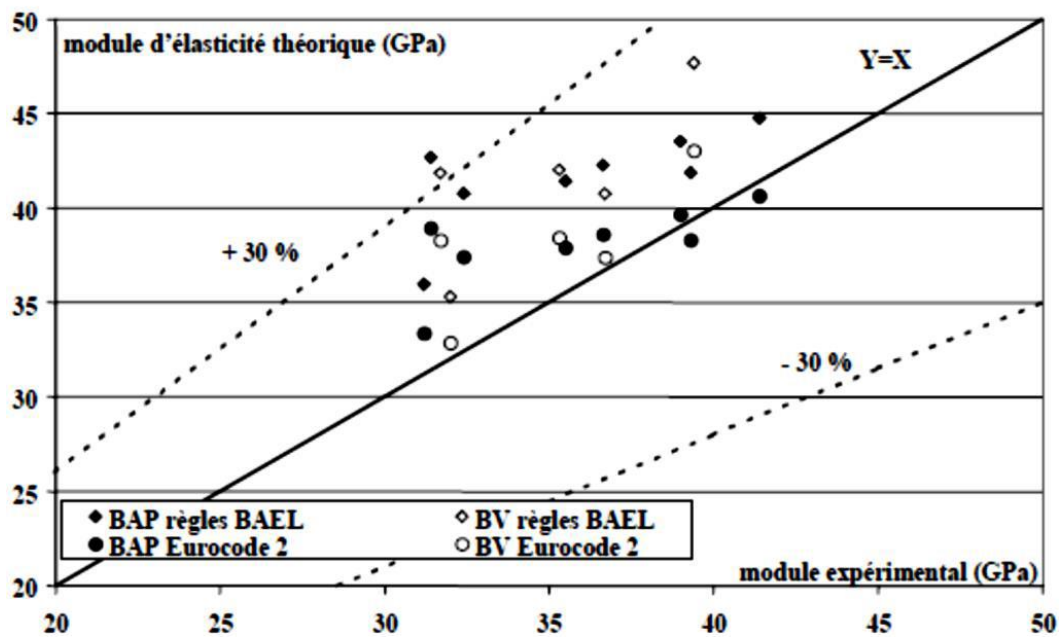


Figure 1.5. Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales[76]

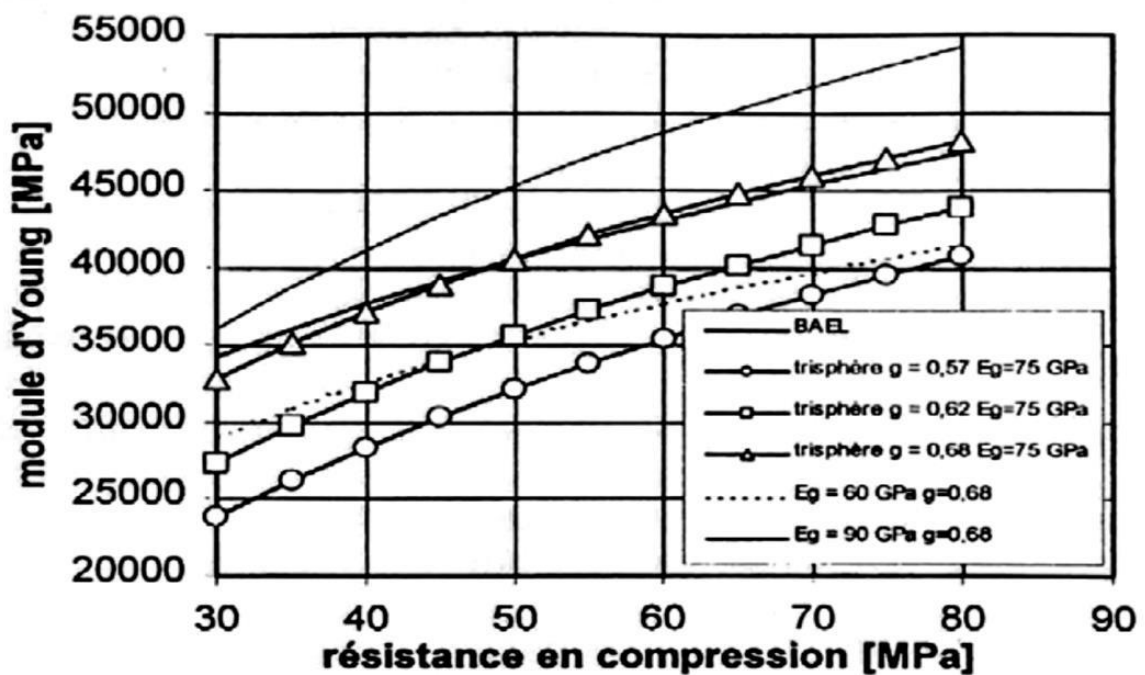


Figure 1.6. Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [63]

1.7.2 Le Retrait :

Le retrait est une diminution de volume liée à la dessiccation du béton, au moment de la mise en œuvre puis au cours du vieillissement de l’ouvrage. Cette diminution crée des contraintes de traction dans le matériau. Si ces contraintes sont plus importantes que la limite de rupture du béton, il y a rupture du matériau, ce qui se traduit par des fissures.

Le phénomène a été observé dès les premières utilisations du béton de ciment, et fait encore aujourd’hui l’objet de recherches. Beaucoup de facteurs influent sur le retrait et ses conséquences, et il est difficile d’en faire l’analyse exhaustive. Les désordres causés par le retrait se caractérisent essentiellement par des fissures, dont la gravité est à analyser en fonction de la nature des pièces affectées et de leur environnement .Dans cette article on passe en revue rapidement les différents types de retrait

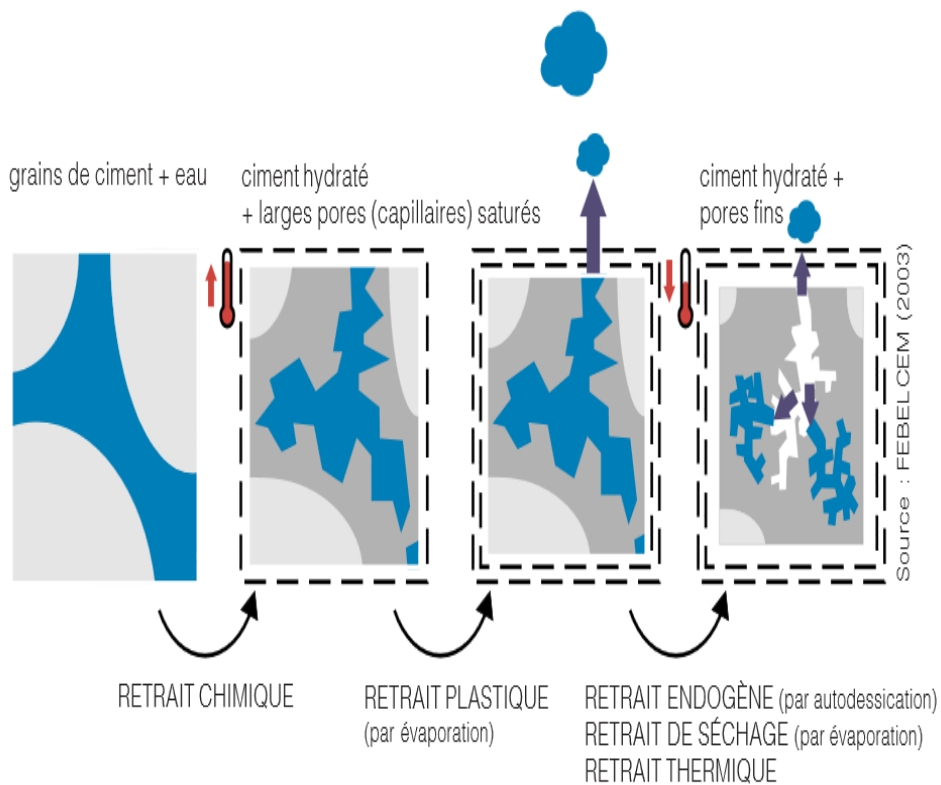


Figure.1.7. Différent types de retrait

1.7.2.1 Retrait chimique

Ce phénomène résulte directement des réactions d’hydratation du ciment. Comme on peut le voir dans cet exemple ci-dessous, Il y a une perte de volume entre les réactifs et les produits de réaction.[78] Cette perte volumétrique également appelée contraction Le Chatelier est à l’origine du retrait chimique :



	2C ₂ S	6H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃	3 Ca(OH) ₂	
Poids	456.6	108	342	222.3	(g)
Masse vol	3.15	1	2.71	2.24	(g/ml)
volume	145.0	108	123.4	99.2	(ml)

Exemple de réaction d'hydratation

Retrait chimique volumique du C₂S : $R = ((145+108)-(123,4-99,2)) / (145+108) = 10.8\%$. Le déficit volumétrique est également présent pour toutes les réactions d'hydratation initiales et tardives :

Tableau1.1 Resultat du Retrait chimique (Le Chatelier)

Nombre de moles	1	5.3	1	1.3
Masse molaire (g/mol)	228	18	227.4	74
Masse de la réaction (g)	228	95.4	227.4	96.2
Densité (g/cm³)	3.15	1	2	2.24
Volume de la réaction (cm³)	72.4	95.4	113.7	42.9
	V réactifs = 167.8 (cm³)		V réactifs = 167.8 (cm³)	
	produits = 156.6 (cm³)		produits = 156.6 (cm³)	

1.7.2.2 - Retrait plastique

Le retrait plastique est défini, de manière classique, comme la contraction du béton en phase plastique ultérieure au séchage. Il se développe lors que la quantité d'eau évaporée à la surface est supérieure à la quantité d'eau de ressuage[79, 80]. En effet, certaines études sur les bétons à hautes performances font état de fissuration possible avant la fin de prise, malgré toute protection contre l'évaporation[81, 82]. Cette fissuration est aussi la conséquence du retrait endogène, de grande amplitude chez les bétons de rapport E/C inférieur à 0,4. Il reste à définir la "phase plastique". C'est la période s'écoulant entre la fabrication et le début de prise, période pendant laquelle le béton ne présente pas de cohésion. Mais, comme le début de prise

est difficile à mesurer pour un béton, les mesures de retrait plastique disponibles dans la littérature englobent très souvent la contraction totale pendant la prise.

1.7.2.3 - Retrait d'auto-dessiccation :

Le retrait d'auto-dessiccation correspond au départ de l'eau des pores capillaires, de l'eau

- ✓ absorbée ou encore de l'eau des hydrates[83, 84]. Il est défini donc par :
- ✓ Le retrait par variation de la dépression capillaire.
- ✓ Le retrait par variation de la tension superficielle du solide, due à la diminution de l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée.
- ✓ Le retrait par variation de la pression disjonctive liée aussi à une diminution de la couche d'eau adsorbé.

1.7.2.4 - Retrait endogène :

Des changements volumiques se produisant après la prise peuvent prendre la forme de retrait ou gonflement. Lorsqu'un apport d'eau existe, la poursuite de l'hydratation conduit à une expansion. Par contre, lorsque le mouvement de l'humidité de /ou vers la pâte de ciment n'est pas possible, on observe un retrait qui est la conséquence de l'absorption de l'eau des pores capillaires due à l'auto-dessiccation. Le retrait d'un tel système est connu comme étant le retrait endogène ou encore une variation volumétrique endogène et il se produit, en pratique, à l'intérieur des pièces massives de béton[85].

D'après le même auteur la contraction de la pâte de ciment est empêchée par le squelette rigide formé par la pâte de ciment déjà hydratée ainsi que par les granulats. Bien que le retrait endogène du béton soit tridimensionnel, il est généralement exprimé comme une déformation linéaire, ce qui permet de le comparer avec le retrait de séchage. Le retrait endogène tend à augmenter lorsque la température est plus élevée, lorsque le dosage en ciment est plus élevé, vraisemblablement lorsque le ciment est plus fin et pour les ciments ayant une teneur élevée en C3A et C4AF[85].

D'après le même auteur, Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés[76]. Persson[83] montre aussi que les BAP sont sujets à des déformations libres (retraits endogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance.

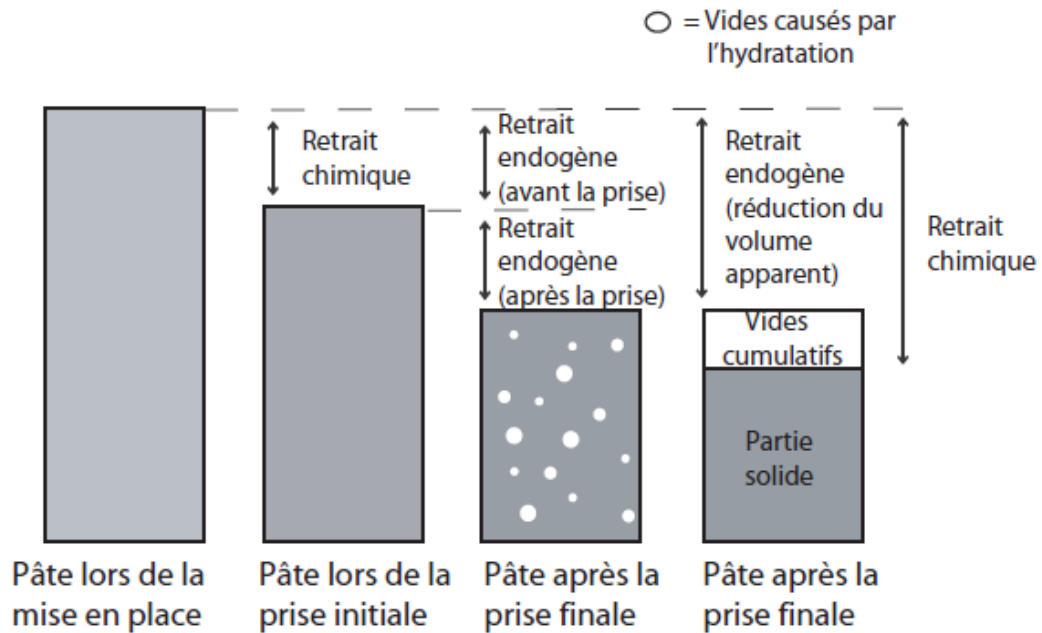


Figure 1.8. Illustration des différentes étapes du retrait chimique lors de l’hydratation du béton.

Le retrait chimique, se produit durant toute la durée de l’hydratation du béton. Si l’auto dessiccation est prévenue, le retrait chimique total ne cause pas de variations apparentes des dimensions de l’élément de béton ’étant donné que la plus grande quantité de changement volumétrique est interne (BEDARD)[86].

Les retraits chimiques et endogènes sont deux types de retraits qui surviennent durant l’hydratation du béton. Il faut par contre considérer que d’autres formes de retrait peuvent également survenir dans le béton.

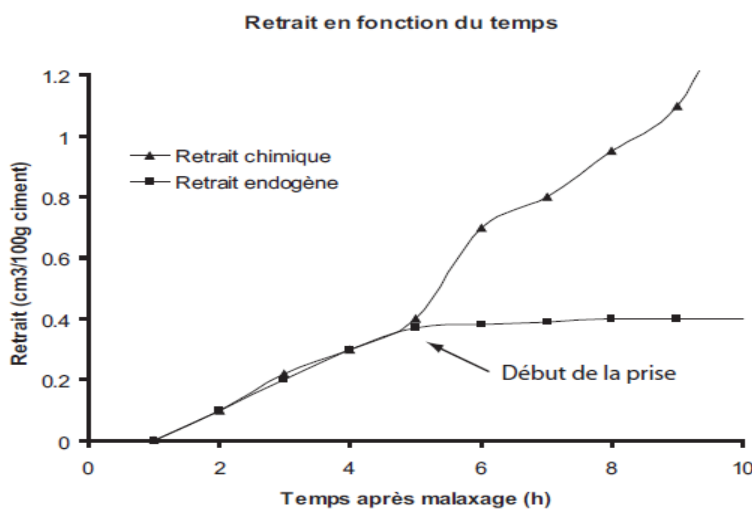


Figure 1.9. Distinction graphique entre le retrait endogène et le retrait chimique (BEDARD)[86].

1.7.2.5 - Retrait de dessiccation (séchage) :

Avant que la réaction chimique débute, le béton contient une quantité initiale d'eau. Selon le rapport E/C du béton, la majorité de cette eau est consommée par la réaction chimique lors de l'hydratation du béton. Si le béton n'est pas en conditions scellées, une partie de l'eau, qui n'est pas consommée dans les premiers temps de la réaction chimique, a tendance à s'évaporer (cela peut cependant varier selon les conditions externes auxquelles est exposé le béton). Ce phénomène est dû à la tendance naturelle au rétablissement d'un équilibre entre l'humidité relative du béton et l'humidité relative de l'environnement ambiant. La perte d'humidité à l'intérieur du béton a comme conséquence de créer le retrait de séchage.

[87] Aïtcin et col. Expliquent que le retrait de séchage est un phénomène de dessiccation localisé qui commence à se développer à la surface du béton par où s'évapore l'eau interne du béton. La cause essentielle du retrait de séchage est, évidemment, l'évaporation de l'eau contenue dans les capillaires de la pâte de ciment hydraté à partir des surfaces de béton exposées à l'air ambiant. L'évaporation se produit aussitôt que le degré hygrométrique de l'air ambiant, est inférieur à celui qui règne dans le réseau capillaire. Les forces de tension développées dans les ménisques à l'intérieur du béton entraînent une contraction du béton.

La valeur du retrait de séchage dépend de plusieurs facteurs. Il est possible de contrôler l'évaporation de l'eau contenue dans le béton frais en utilisant une méthode de cure adéquate (application d'un produit de cure, mise en place de jute humide).

1.7.2.6- Retrait thermique :

Il est dû aux gradients de température qui se manifestent dans le béton lors d'un déséquilibre calorifique. Ces variations de température interne sont induites soit par une source de chaleur externe (d'origine naturelle, climatique ou industrielle par traitement thermique ou cure) soit par une source interne, comme celle issue de la nature exothermique des réactions d'hydratation. La quantité de chaleur interne produite par l'hydratation peut être assez importante surtout dans les ouvrages massifs où la capacité de conduction thermique du béton est faible comparée aux cinétiques d'hydratation. Ceci conduit à un fort gradient entre le cœur du béton, où la température est assez élevée, et l'extérieur, qui a commencé à se refroidir. La température due à la chaleur d'hydratation peut atteindre les 80° C dans le cas d'ouvrage massif (pile de pont par exemple [88](DIVET)). Cette compétition entre la dilatation thermique à l'intérieur et la contraction à l'extérieur, à un moment où le béton est déjà rigide, entraîne la création de contraintes supplémentaires en tractions. Si ces contraintes dépassent la résistance limite du matériau, une fissuration se produit. Selon la nature de la structure mise en jeu, deux types de Fissuration thermique peuvent être ainsi distingués :

a) La fissuration de peau : (cas des blocs de fondation coulés en continu, segments de piliers...), elle est due aux gradients locaux de température. Ces fissures sont toutefois peu ouvertes vu que la distance séparant deux fissures principales consécutives est de l'ordre de grandeur de la profondeur de la zone de traction, qui ne peut excéder le quart de l'épaisseur de la structure.

b) La fissuration localisée : Dans le cas des joints de bétonnage (plaques minces coulées sur plusieurs couches) ou des structures à extrémité(s) fixée(s) (barrages, plaques fixées au bloc de fondation, chape sur support rigide ou sol...), des fissures localisées peuvent avoir lieu. Elles sont largement espacées (dans les chapes en béton continuellement restreint 'CRC', la distance entre deux fissures peut être supérieure à 50 m) et généralement beaucoup plus ouvertes que les précédentes [89](HAOUAS). Notons que cette grande variabilité dans l'espacement (allant de quelques centimètres jusqu'à plusieurs dizaines de mètres) et l'ouverture des fissures est plutôt liée à la fonction critique des conditions aux limites mécaniques de la structure qu'au paramètre thermique et mécanique du matériau.

1.8. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives aux BAP, bétons de fabrication récente, par rapport à celle des bétons Traditionnels, que l'on peut considérer être connue. L'étude bibliographique menée est consacrée à la présentation des propriétés physiques, mécaniques et la détermination des paramètres qui influent sur le béton vis-à-vis de phénomène de retrait et la mesure du retrait libre (retrait de séchage et retrait endogène) ainsi que la perte de masse.

CHAPITRE 2

Matériaux utilisés et Essais Réalisés

2.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux entrant dans la composition des bétons de notre étude et les techniques expérimentales utilisées. On présente en première partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux de base utilisés dans la composition des bétons. Dans une seconde partie, on exposera la méthode de formulation adoptée. Ensuite, on présente les essais réalisés sur le BAP étudié à l'état frais et à l'état durci.

2.2 Identification des matériaux

2.2.1 Caractérisation du ciment

Un seul type de ciment est utilisé dans toute l'étude : un ciment CPA CEM I 42,5 de la Société ACC. Le choix de ce type de ciment est justifié par l'étude de l'effet du sable sur les performances des bétons autoplacants Sa surface spécifique est de 300 m²/kg, sa densité est de 3,15 et sa résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5.

Tableau 2.1 Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé

Composition chimique (%)	
SiO ₂	21,9
CaO	65,9
MgO	1,6
Al ₂ O ₃	4,8
Fe ₂ O ₃	3,5
SO ₃	0,48
MnO	-
K ₂ O	0,4
TiO ₂	-
Na ₂ O	0,7
Perte au feu	0,3
Composition minéralogique (%)	
C ₃ S	64,7
C ₂ S	14,5
C ₃ A	6,8
C ₄ AF	10,6
Caractéristiques physiques et mécaniques	
Densité	3,15
Finesse de Blaine (m ² /kg)	300
Temps de prise (hh.mm)	01.45
Résistance mécanique (MPa)	42,5

2. 2.2. Granulats

- Grapiers 8/15 et Grapiers 3/8 (Laghouat)

- Sable alluvionnaire 0/5 de Laghouat

2.2.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection de béton est une eau du réseau d'eau potable

2.2.4. Caractérisation des granulats

2.2.3.1 Gravier

Les graviers utilisés sont de classe granulaire 3/8 et 8/15 issus de concassage des roches calcaires.

Tableau 2.2 : Analyse Granulométrique du Gravier 3/8 et 8/15

Analyse Granulométrique			
Caractéristiques	Valeurs		
Granulométrie	Tammis (mm)	Passant (%)	
		3/8	8/15
	31.5		
	25		100
	20		100
	16		97.4
	12.5	100	35.33
	10	98.88	10.5
	8	75.88	0.33
	6.3	34.63	0.33
	5	17.06	0.27
	2.5	0.63	
	1.25	0.38	
0.63	0.25		

La représentation graphique de ces résultats est donnée dans la figure 01

Tableau 2.3 : Caractéristique physique des Gravier 3/8et 8/15

Caractéristiques	Gravier 8/15	Gravier 3/8
Coefficient d'absorption d'eau (%)	3.8	4.9
Propreté (%)	1.6	2.2
Coefficient Los Angles (%)	26	29
Densité apparente (t/m3)	1.37	1.34
Densité absolue(t/m3)	2.63	2.62

2.2.3.2. Sable :

Le sable est l'un des composants importants dans la réalisation des béton autoplaçant, il s'agit d'un sable naturel alluvionnaire (SA) de la région de laghouat,

Tableau 2.4 : Analyse Granulométrique de Sable 0/5

Diamètre de tamis Ø	Tamisât %
8	100.0%
5	88.5%
2,50	81.8%
1,25	77.1%
0,63	62.0%
0,315	12.4%
0,16	1.9%
0,08	0.3%
fond	0.0%

Tableau 2.5 : Caractéristiques physiques du sable 0/5

Essai	Sable alluvionnaire	Exigence de NA5043
Equivalent de sable (%)	84.25	≥65%
Coefficient d'absorption d'eau (%)	0.5	
Module de finesse	2.76	$1,5 \leq MF \leq 2,8$
Poids spécifique (t/m ³)	2.62	0
Masse volumique apparente (t/m ³)	1.73	0

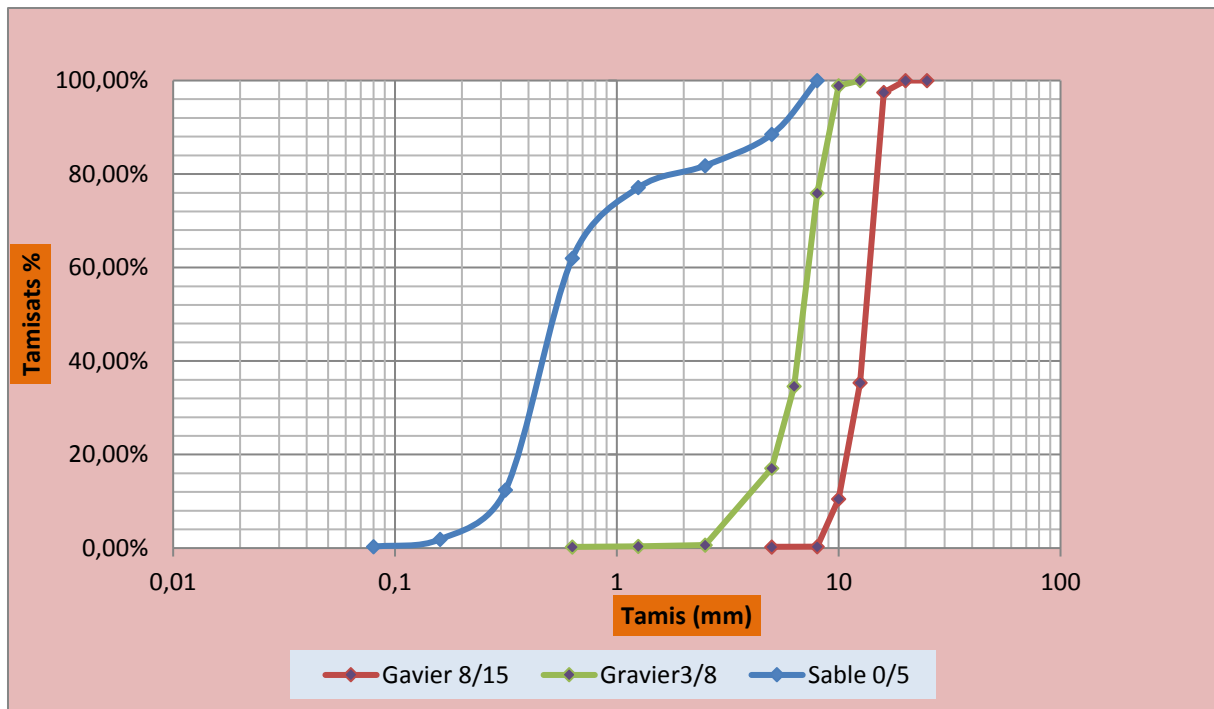


Figure 2.1 les courbes granulométriques du sable 0/5 ; gravier 3/8 et 8/15

2.2.5 Adjuvant

Les adjuvants permettent d’obtenir une grande fluidité et une parfaite homogénéité qui sont nécessaires à l’obtention d’un béton autoplaçant. Un seul type d’adjuvant a été utilisé durant notre étude, un superplastifiant MEDAFLOW 30, c’est un haut réducteur d’eau de la troisième génération, sous forme de liquide et d’une couleur jaunâtre, et conçu à base de polycarboxylates. La densité, le pH et l’extrait sec de ce superplastifiant sont respectivement 1.07, 6.5 et 30 %. Il possède une teneur en ions chlore inférieure à 0,1%. MEDAFLOW 30 permet de diminuer le rapport eau/ciment (E/C) tout en améliorant considérablement la fluidité du béton. Il permet aussi d’augmenter les résistances mécaniques au jeune âge et à long terme.

La plage de dosage recommandée du MEDAFLOW 30 est de 0.5 à 2 %. Toutefois, le dosage optimal doit être recherché selon le type de béton et les propriétés recherchées par la réalisation des gâchés au laboratoire.

2.2.6. Poudre de marbre

La composition chimique et les principales caractéristiques physiques du poudre de marbre ont été établie en mars 2017, à la cimenterie de Hammam Dhalaa (LAFARGE) voir tableau et figure si dessous :

Tableau 2. 6 Composition chimique et minéralogique du poudre de marbre utilisé

Composition chimique (%)	
SiO ₂	0.00
CaO	55.78
MgO	0.47
Al ₂ O ₃	0.09
Fe ₂ O ₃	0.01
SO ₃	0.05
Na ₂ O	0.00
K ₂ O	0.00
CL-	0.008
Perte au feu	43.28
Composition minéralogique (%)	
R-wp	6.19
Calcite	98.96
Dolomite	0.64
Quartz	0.14
Pyrite	0.0
Illite	0.05
Chlorite	0.06
Kaolinite	0.16
Albite	0
Caractéristiques physiques (%)	
Densité absolue	2,70
Densité Apparente	1,71

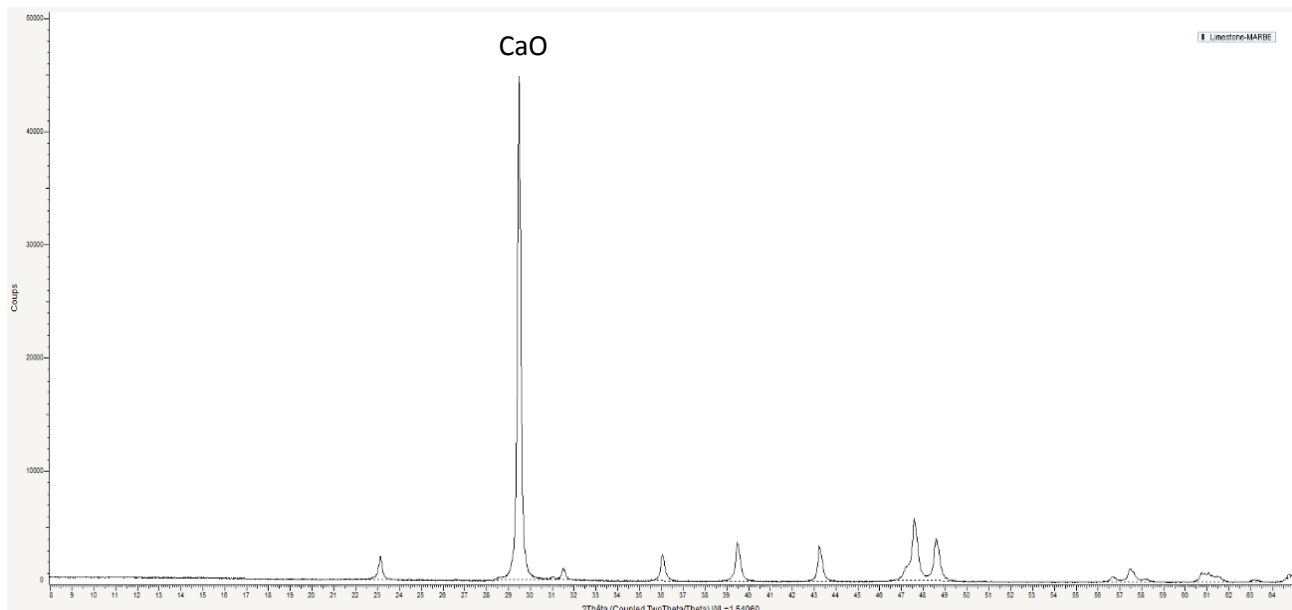


Figure 2.2. Diagramme de diffraction X du poudre de marbre été établie en mars 2017, à la cimenterie de Hammam Dhalaa (LAFARGE)

Notre poudre de marbre a été Passé au tamis 80 μ m Proche au finesse du ciment .

2.3. Formulation

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériaux de la gâchée, afin d'obtenir le béton qui aura les propriétés souhaitées. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Liant (E/L).Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Évidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais : la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation Bouhamou et al.[90]précisent que la formulation du BAP requiert une étude précise notamment dans le choix de ses constituants, et l'optimisation des paramètres influant en particulier les rapports eau/ciment (E/C), le rapport addition/Ciment (F/C), le dosage en superplastifiant, le volume de pâte et le diamètre maximal des gravillons .Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier es différentes propriétés définies ci-dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton avec les termes qualitatifs de fluidité, hétérogénéité et absence de blocage Dans notre étude nous nous

étions fixés comme but essentiel l'influence de type du sable ,sur les caractéristiques le rapport Eau/Liant (E/L), ainsi que le pourcentage en superplastifiant par rapport au liant Sp/L).La formulation que nous avons adoptée est basée sur la formulation proposée par le japonais Okamura et appelée la méthode générale, avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport eau/liant ainsi que le rapport superplastifiant/liant. Ces derniers ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs de l'étalement au cône d'Abrams et du temps d'écoulement au V-funnel acceptables. Pour la sélection des quantités d'air et de graviers, la méthode Okamura a été maintenue.

2.3.1. Formulation du Mortier (MAP) :

Le mortier dans le BAP fournit une stabilité globale du béton ; un mortier est considéré comme auto-plaçant ; s'il a une fluidité élevée et une suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques , La fluidité élevée du mortier autoplaçant(MAP) peut être obtenue en ayant recours à des superplastifiants sans augmenter le rapport eau/ciment .Selon Jin et Domone[91] des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominantes.
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode et simple que tester un béton.

Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BP , c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement [91]. la formulation du mortier autoplaçant, et comme mentionné précédemment, on s'est basé sur la méthode Okamura avec une amélioration au niveau de la teneur en sable, le rapport Eau/Liant (E/L) et le rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L) pour s'adapter aux propriétés des matériaux locaux et en particulier le sable. La sélection du rapport sable/mortier et du rapport Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$ [91].

2.3.1.1. Rapport Eau/Liant (E/L)

Afin de fixer le rapport eau / liant (E/L) , nous devons faire des essais d'étalement et d'écoulement . Felekoglu et al.[23]ont montré que le rapport E/C optimum pour produire un BAP est compris dans l'intervalle 0,84 et 1,07 en volume qui correspond à l'intervalle 0,28 et

0,45 en masse. Les rapports E/C au dessus et en dessous de cet intervalle peuvent causer un blocage ou une ségrégation du mélange.

Les différents essais préliminaires ont montré qu'il faut aller jusqu'au rapport 0,40 afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270 mm surtout dans le cas de faibles dosages en superplastifiants. Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0,40.

2.3.1.2. Rapport Sable/Mortier (S/M)

Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports Sable/Mortier (S/M) de 0,60; 0,55 et 0,50 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/liant (Sp/L).

2.3.1.3. Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en superplastifiants sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement (cône d'Abrams) et du temps d'écoulement (V-funnel), en fonction du dosage en superplastifiants Sp/L variant de 0.6% à 2%.

2.3.1.4. Confection des mortiers

Pour la confection du mortier du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) nous avons opté pour la proposition de Domone et Jin[23] :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange
- Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

Nous avons fixé $E/L = 0.40$ et une grande valeur de $SP/P = 1.1$ est qui nous a donné directement un bon résultat sur l'essai à l'étalement sans passer par des essais intermédiaires.

Dans notre étude, pour obtenir un mortier autoplaçant, les trois critères suivants doivent être satisfaits simultanément :

- **Grande déformabilité** : ce critère se traduit par une valeur d'étalement comprise entre 27 et 33 cm ;
- **Viscosité adéquate** : un temps d'écoulement variant entre 2 et 10 s permet de formuler un mortier de viscosité appropriée ;
- **Résistance à la ségrégation** : un mortier autoplaçant ne doit présenter aucun signe visible de ségrégation ni de ressuage

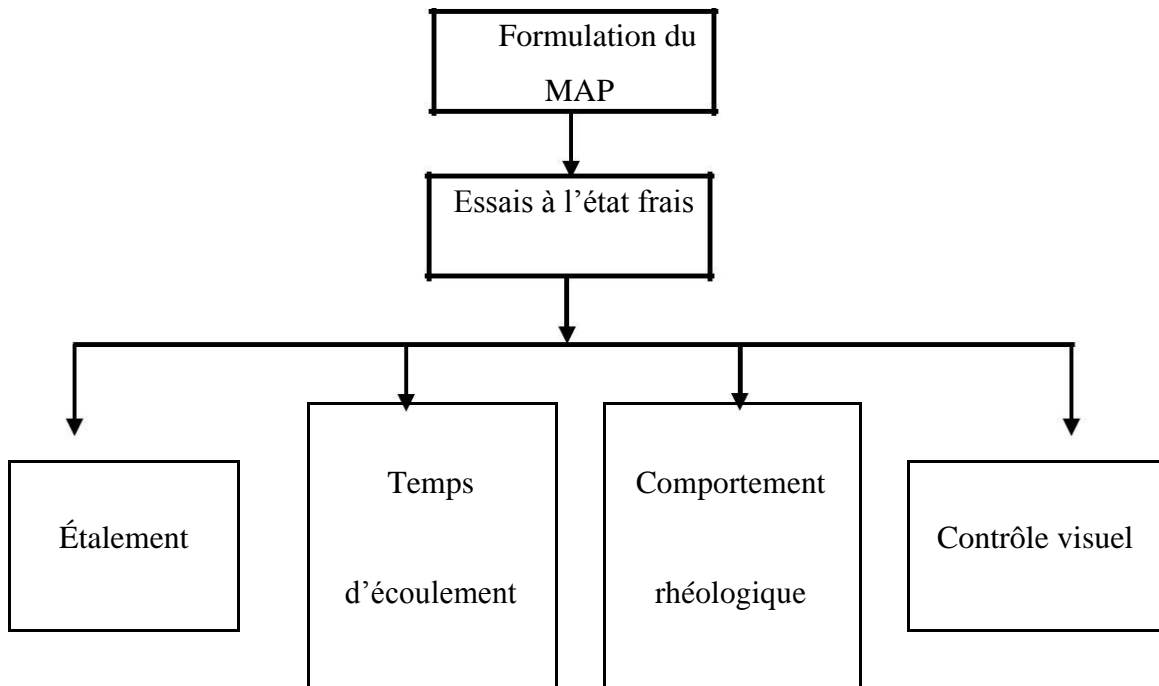


Figure 2.3. Organigramme des essais réalisés sur mortiers autoplaçants à l'état frais.



Figure 2.4. Essai d'étalement au mini-cône : (a) exécution de l'essai, (b) mesure de l'étalement.

Le résultat trouvé sur mortier testé montrent également que la valeur obtenue est de l'ordre de 32cm qui se situe à l'intérieur des plages ciblées (27÷33 cm) pour l'étalement. Pour ce qui concerne le contrôle visuel, les constatations montrent que le mélange MAP est fluide et homogène, pas de signe de ressuage. De ce fait, un dosage en SP de 1.1% est considéré le dosage efficace sans risque de ressuage ou de ségrégation.

Le dosage de SP est fortement influé par la composition du mortier, et en premier lieu le type de sable et sa teneur en fines.

2.3.2. Formulation du BAP

Les essais sur mortier est une étape primordiale car elle permet de fixer les rapports E/L (eau/liant), S/M (sable/mortier) ainsi que Sp/L (superplastifiant/liant). Du moment que le mortier, dans les bétons autoplaçants, occupe un volume important dans le mélange, les résultats des essais sur mortier seront concluants, les rapports E/L et Sp/L seront ajustés afin d'aboutir des résultats adéquats pour un bon étalement sans ségrégation ni ressuage. Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1m³ de béton en ayant comme données les paramètres suivants :

- Un rapport G/S proche pour favoriser la maniabilité du béton proche de 1.
- Un rapport E/L = 0.40,
- Un dosage en ciment plutôt élevé, celui-ci est posé égale à 422 Kg/m³, ce dosage assure à la fois une bonne résistance mécanique et un dosage en fines élevée.
- Le volume de la pâte est 400 L/m³(C+F)
- Un pourcentage en superplastifiant est déterminé de façon à limiter la ségrégation et obtenir un écoulement compris entre 55cm et 850 selon AFGC. Ce dosage est démontré d'après la fiche technique accompagnant le produit utilisé, le dosage conseillé est 0.5% à 2%. On a pris un rapport de SP/L = 1.1.
- Le dosage en fillers marbre est utilisé est de F/L = 0.10, avec une quantité de 41 Kg/m³,
- La quantité d'eau utilisée est déterminée par le rapport E/L.

Dosage des granulats (sable, gravier «3/8,8/15 ») et calculer par la relation : $G+S+E+C+A=1000$ le volume de sable est 50% de la masse de ciment (S/M = 0.50). Cette quantité limite le blocage du BAP dans les milieux fortement ferraillés. Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser (2/3)8/15 et (1/3) du 3/8.

On obtient la formulation décrite dans le (tableau 2.6) :

Tableau 2.7 : Formulation de BAP pour 1 m³

Constituants	Poids en kg pour 1m ³	Poids en kg pour 30 Litres
Sable	879.06	26.37
Gravier 8/15	532.09	15.96
Gravier 3/8	262.92	7.89
Ciment	422.83	12.69
Poudre Marbres	40.92	1.23
Eau	221.50	6.64
Superplastifiant MEDAFLOW 30	5.10	1.53

2.3.2.1 Confection des bétons autoplaçants

Pour un faible rapport eau /liant et un fort dosage en superplastifiant, le mélange nécessite un temps de malaxage plus prolongé[92], De Larrard et al.[7] ont montré que l'étalement et la résistance à la compression sont les plus influencés par le temps de malaxage. La procédure de malaxage adoptée est celle proposée par Domone et Jin [23] :

- Calculer l'eau efficace que l'on introduit dans le malaxeur en prenant en compte la teneur en eau et l'absorption des granulats ainsi que l'eau contenue dans l'adjuvant
- Calculer les proportions du ciment, sable, gravier et superplastifiant
- Malaxer le sable, ciment et gravier pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange.
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau)
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau).

2.4. Méthodes d'essais

2.4.1. Essais sur mortier

2.4.1.1. Essais sur mortier à l'état frais

a. Essai d'étalement au Mini-Cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenue. La figure 2.6 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

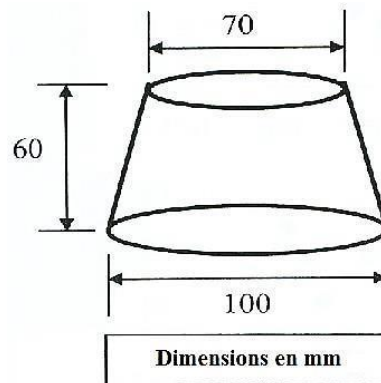


Figure 2.5. Mini cône pour mortier

b. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai d'écoulement à l'entonnoir (ou V-funnel test) est utilisé pour évaluer la fluidité et la viscosité des MAP. Un entonnoir de dimensions définies est rempli de mortier jusqu'en haut (1.1 litre). Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, on mesure le temps (T_v) que met le mortier à sortir de l'entonnoir jusqu'à ce que cet entonnoir soit entièrement vide (Fig. 2.5.). Ce temps d'écoulement, qui doit être compris entre 8 et 14 secondes, caractérise la viscosité du mortier. Si le mortier s'écoule plus rapidement, c'est que sa viscosité est trop faible. L'EFNARC [93] définit deux classes de viscosité selon le temps d'écoulement mesuré à l'entonnoir (V-funnel) : $T_v \leq 6$ secondes, pour une bonne capacité de remplissage même avec des renforts denses et $9 \leq T_v \leq 25$.

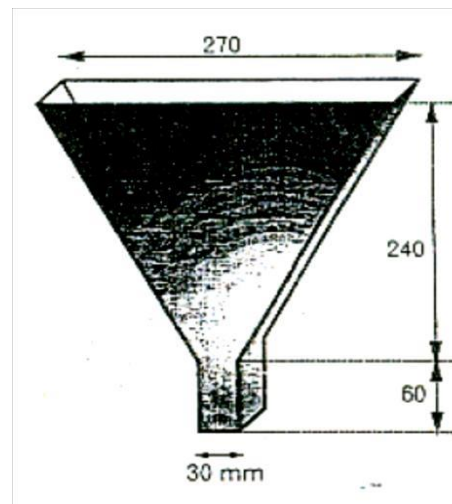


Figure 2.6. L'Entonnoir en V pour Mortier

2.4.2. Essais sur BAP

2.4.2.1. Essais sur BAP à l'état frais

Les essais proposés par l'AFGC caractérisent les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais et qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisés. Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP.

L'ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques principales :

- { Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams)
- { Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L)
- { Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis)

a. Essai d'étalement au cône d'Abrams (*Flow test*):

L'essai d'étalement peut être utilisé pour évaluer la capacité de remplissage à l'état libre en l'absence d'obstacles. Cet essai permet de déterminer l'habilité du béton à se déformer sous son poids propre. C'est l'essai type pour évaluer la déformabilité libre du béton autoplaçant et de tester la fluidité du béton [90].

L'essai d'étalement est effectué à l'aide d'un cône d'Abrams. Ce dernier est un cône sansfond, dont le diamètre de base inférieur est de 203 mm et le diamètre de base supérieur est de 102 mm. Il a une hauteur de 305 mm. Le cône d'Abrams est habituellement utilisé pour caractériser les bétons conventionnels par une mesure d'affaissement. Dans le cas des bétons autoplaçants, l'essai de l'affaissement au cône d'Abrams n'est pas significatif car ces bétons sont trop fluides. On utilise donc une mesure de l'étalement. Le principe de l'essai reste cependant le même.

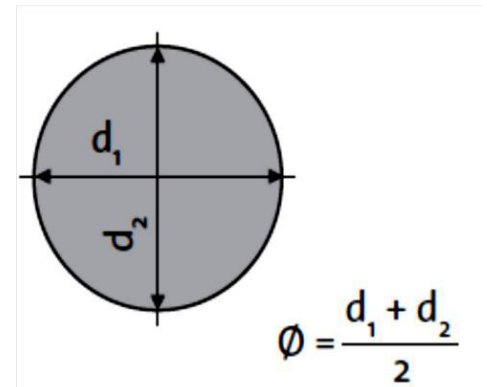
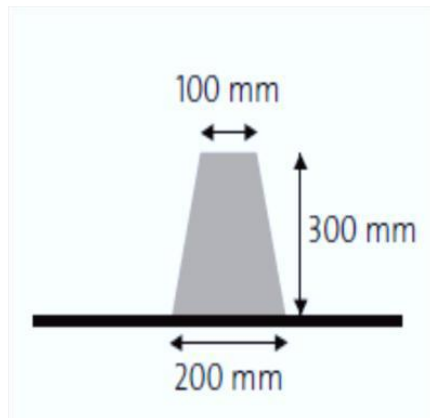


figure 2.7. Cône d'Abrams

. On commence par humidifier la plaque métallique et par la suite on centre le cône d'Abram sur cette plaque équipé sur sa partie supérieure d'un entonnoir.



Figure2.8: Plaque métallique et cône d'Abram (Slump Flow centrée)

On remplit le cône de l'échantillon de béton à tester, puis on soulève le cône lentement pour permettre au béton de s'étaler. Cette opération de soulèvement du cône doit durer 5 secondes environ, On déclenche le chronomètre dès le soulèvement du cône est-ce, jusqu'à ce que le béton atteigne le cercle de 500 mm imprimé sur la plaque. Ce repère s'appelle T50, . Une fois le béton est complètement étalé sur la plaque, On mesure ensuite la taille de la galette de béton obtenue (Figure2.7). Sa dimension correspond à la moyenne de deux diamètres mesurés. 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 [68].



Figure 2.9. Essai d'étalement

Inspecter visuellement pour recherche d'éventuels signes de ségrégation de béton ou autres anomalies telles que la présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette ou accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier.

Selon EFNARC[93], la mesure de l'étalement au cône d'Abrams, peut être divisée en trois (03) classes. Le tableau 2.8 définit ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP:

Tableau 2.8. Classes des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation

Classe	Etalement (mm)	Domaine d'utilisation du BAP
SF1	550 - 650	Structures non ou peu ferrillées. Béton coulé à partir du haut (ex. les dalles) ➤ Coulage par système de pompage du BAP (ex. les tunnels) ➤ Petites sections (ex. les piles et les fondations profondes)
SF2	660 - 750	➤ La majorité des applications
SF3	760 - 850	➤ Applications verticales ➤ Structures trop ferrillées ➤ Coulage à partir du dessous du coffrage ➤ Structures de forme complexe

b. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'entonnoir en V mis en place par Okamura et Ozawa[84] permet d'évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir en V (en secondes). Figure 2.10

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la figure 2.10, est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du BAP. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton BAP.

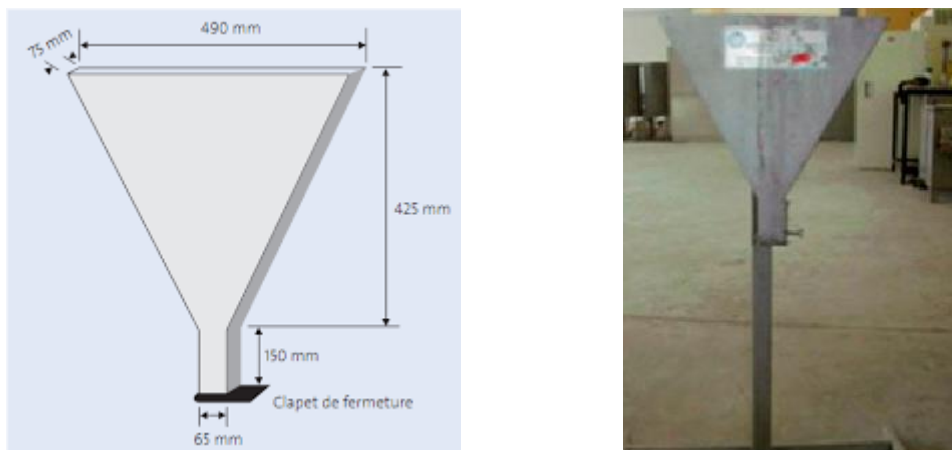


Figure 2.10 : Essai de l'entonnoir en V

b. Essais d'écoulement à la boîte en L (L-Box test)

Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures. Le schéma de la boîte ainsi que le principe de l'essai sont décrits sur la figure suivante. La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute. On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage standard (39 mm entre 3 barres $\phi 14$). Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H2/H1. Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur 0.8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation

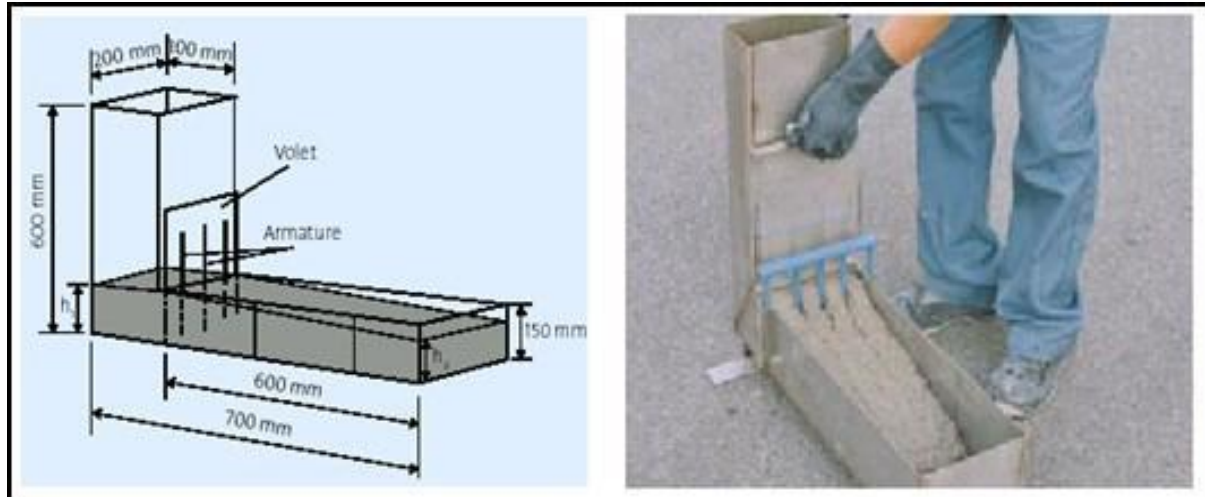


Figure 2.11. boîte en L (L-box)

d. Essai de stabilité au tamis (Résistance à la ségrégation)

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. On calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P_i = \frac{\text{Plaitance}}{\text{Péchantillon}} = 100$$

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP [5] :

- { 0% < % Laitance < 15 %) Stabilité satisfaisante
- { 15% < % Laitance < 30 %) Stabilité critique
- { % Laitance > 30%) Stabilité très mauvaise

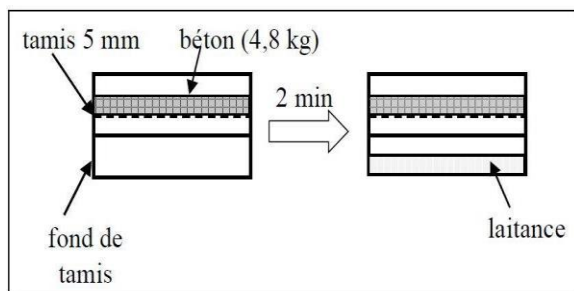


Figure 2.12. Essai de la stabilité au tamis

Dans notre travail on s'est limité uniquement à l'essai au cône d'Abrams.

2.4.2.2. Essais sur BAP à l'état durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois (voire des années), les propriétés mécaniques recherchées sont :

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton
- les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées

a. Essais non destructifs(essai ultrasonique)

Les essais non destructifs sur les éprouvettes permettent de déterminer la vitesse d'impulsion ultrasonique dans le béton..

La méthode de la vitesse d'impulsion ultrasonique a été également utilisée dans cette étude afin de déterminer l'homogénéité du béton, la présence de fissures ou de vides, les changements de propriétés dans le temps et des caractéristiques physiques et dynamiques.

Pendant les essais expérimentaux, le temps et la vitesse de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton est enregistré. [94] :

$$V=L/T$$

Où: V: la vitesse d'impulsion (m/s);

L: la longueur du parcours (m),

T: le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur (s).

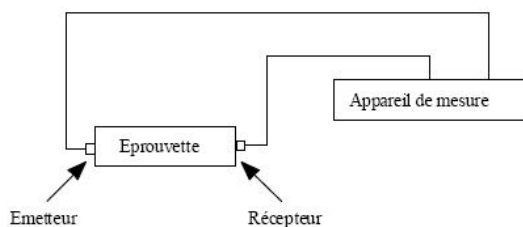


Figure 2.13 Appareil d'essai ultrasonique la Punditlab+

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés.

Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

- Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores selon STURRUP, VECCHIOET CARATIN (1984)
- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé-Étalonnage de l'appareil
- L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige étalon dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué sur la tige étalon

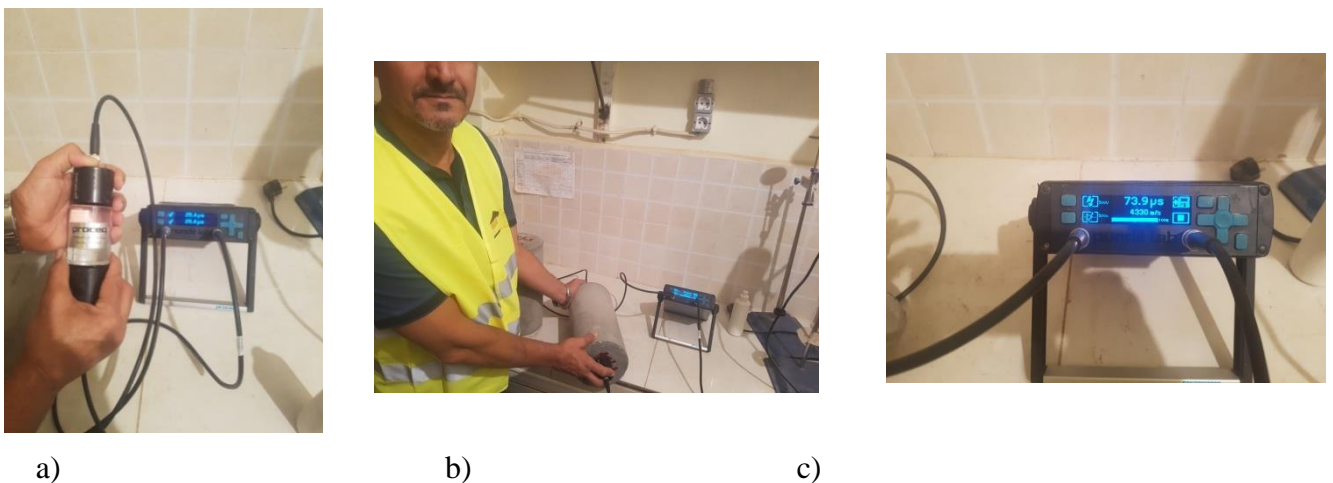


Figure 2.14 a)contrôle d'étalonnage , b) essai ultrasonique sur éprouvette ,

b. Résistance à la compression :

Les essais de compression simple sont réalisés à 3, 7, jours par écrasement d'éprouvettes de bétons cylindriques 16×32cm

Les moules remplis de béton sont entreposés dans une salle régulée à 22 °C pendant

24 heures. Après démoulage, une partie des corps d'épreuves est émergée dans l'eau sous une température de 20°C, Les deux autres sont stockées respectivement, une de ces corps d'épreuves est stockée à l'extérieur dans des conditions climatiques ambiantes une atmosphère douce et à une température variant entre 25°C et 32°C et, l'autre est stocké dans une salle à une humidité relative à 95% emballée (protection) par du film polyane. Ils sont conservés jusqu'à l'échéance des essais,



a)

b)



c)



Figure 2.15: Conservation des éprouvettes : a) dans l'eau, b) à l'air, c) sous film plastique

Avant chaque essai

- les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse volumique apparente afin de vérifier l'homogénéité du béton.
- les éprouvettes sont soumises à un essai ultrasonique afin d'évaluer la compacité du béton
- Les éprouvettes sont placées verticalement et leurs faces sont en contact direct avec les plateaux de la presse. Elles sont chargées jusqu'à rupture dans une machine de presse pour essai de compression.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 1500 kN, asservie en force. La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406 : les essais ont été réalisés sur l'échelle de force la mieux appropriée (600 ou 1500 kN), avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.



a)



b)



c)d)



Figure 2.16 : Essai de compression: a) Presse à béton , b) pesage des éprouvettes, c)Affichage de résultat d'essai d) texture du BAP après écrasement les résultats d'essai voir tableau 2.9 (chapitre 03)

CHAPITRE 3

Résultats et discussions

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter, discuter et interpréter les résultats d'essais sur les bétons auto-plaçants à l'état frais et à l'état durci. Nous commençons par l'optimisation des super plastifiant sur liant (SP/L). On passera ensuite à la discussion des résultats issus des essais sur mortiers, et béton frais tels que l'étalement, le temps d'écoulement, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. A l'état durci, les résultats de certaines propriétés mécaniques (résistances à la compression) et physiques (vitesse d'auscultation sonique) des éprouvettes de BAP curées dans les trois milieu (l'eau, sous film plastique, à l'air ambiant) pour différentes périodes, seront analysés et commentés

3.2 Résultats et interprétation du BAP a l'état frais

La qualité du béton à l'état frais a été vérifiée selon les essais recommandés par AFGC: *d'étalement au cône d'Abrams*, et l'écoulement en boîte en L, essai V-funnel, stabilité au tamis..

Mais on s'est limité uniquement à l'essai *d'étalement au cône*

Les valeurs mesurées de BAP à l'état frais sont présentées dans le tableau 3.1. Les valeurs obtenues par l'essai montrent bien que sont satisfaites aux critères des BAP.

Tableau 3.1 : Résultat d'essai d'étalement (*Propriétés des BAP à l'état frais*)

Constituant	Etalement			
	T50(s)	D1 mm	D2 mm	Dmoy mm
BAP	3.40	720	740	730

Notre BAP est classe SF2 selon EFNARC

3.3 Conditions de cure :

Tous les mélanges ont été préparés et conservés pendant les mois de septembre. Afin d'examiner l'effet du climat chaud (durée et mode de cure sur les résistances à la compression et la vitesse d'auscultation sonique) à jeune âge, sur des éprouvettes d'essai de 16X32 cm.

1-Des éprouvettes curées à l'air libre (à l'intérieur du laboratoire) à $T = 25-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ et HR = 8-33%.

2-Des éprouvettes conservées dans l'eau à l'intérieur du laboratoire pour des durées limitées respectivement de 3 et 7 jours à $T = 20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,

3-Des éprouvettes curée et protégés sous film plastique jusqu'à l'âge de l'essai.

3.4 Résultats et interprétation résistance à la compression –RC

La variation de la résistance en compression des éprouvettes suivant la durée de cure et le mode de cure est présentée dans la figure 3.2 On a constaté clairement que le mode de cure joue un rôle important sur les résistances mécaniques. La résistance en compression des éprouvettes conservées dans l'eau est supérieure à celles conservées à l'air libre et sous film plastique quelque soit l'âge . En outre, la durée de cure contribue aussi au développement des résistances mécaniques. Nous constatons sur la figure3.2 que la durée de cure de 7 jours est bénéfique au développement de la résistance à la compression en comparaison avec celle des éprouvettes conservées dans les autres milieux. Ce résultat a été également observé par d'autres [95] qui ont utilisés un BAP à base d'un ciment contenant de cendre volante. Nous constatons sur la figure 3.1 que les éprouvettes conservés à l'air libre présentent de faible résistance en compression quelque soit l'âge , Nous remarquons aussi un léger différence de résistance en compression entre celles conservées dans l'eau et celles sous film plastique .Ces phénomènes peuvent être expliqués par le fait que, Le manque d'eau pour les matériaux hydrauliques conservés dans l'air libre pénalise le développement des réactions d'hydratation du ciment .le BAP a subit une évaporation qui a conduit à une dessiccation prématurée , cette dessiccation retarde la réaction de l'hydratation du ciment , . En plus cette variation affecte la structure des hydrates construits, ce qui va influencer la résistance mécanique du BAP par contre, dans le cas de cure humide (dans l'eau) la présence de l'humilité importante favorise l'hydratation continue. La concentration sous l'eau, permet à l'eau de pénétrer dans les corps d'épreuve, ce qui est nécessaire aux réactions d'hydratation du ciment et au développement de la réaction pouzzolanique

Tableau 3.2 : Résultats d'essais de compression à 03 jours

Milieu de conservation des éprouvettes	N° de l'éprouvette	Poids (Kg)	Rc (Mpa)	Moyenne RC(Mpa)	Densité apparente Kg/m3
Sous film plastique	01	14.803	25.585	25.136	2316.44
	02	15.072	24.686		
à l'air	03	14.760	17.993	18.620	
	04	14.830	19.246		
Dans l'eau	05	14.779	24.079	25.307	
	06	15.137	26.535		

Tableau 3.3 : Résultats d’essais de compression à 07 jours

Milieu de conservation des éprouvettes	N° de l'éprouvette	Poids (Kg)	Rc (Mpa)	Moyenne RC(Mpa)	Densité apparente Kg/m3
Sous film plastique	01	14.950	31.089	27.860	2284.45
	02	14394	24.603		
à l'air	03	14.285	20.580	24.877	
	04	14.607	29.175		
Dans l'eau	05	14.949	28.595	30.408	
	06	14.950	32.222		

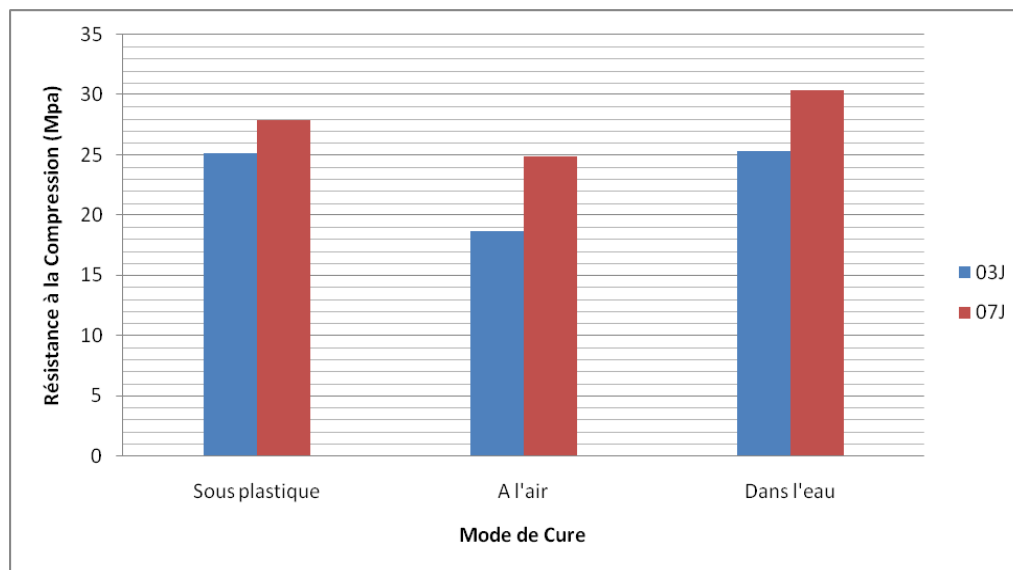


Figure 3.1 Effet de la durée et du mode de cure sur la résistance à la compression.

3.5 Résultats et interprétation auscultation ultra-sonique –UPV:

Le test d’UPV est une technique non destructive qui permet d’évaluer l’homogénéité du béton. La vitesse d’impulsion ultrasonique dans un solide dépend essentiellement des propriétés élastiques et de la densité du matériau. Les résultats obtenus par ce test sont présentés dans les tableaux 3.3 et 3.4. L’évolution moyenne d’UPV aux échéances 3, 7 est présentée dans la figure 3.3. On constate une variation d’UPV qui correspondait au degré de densification à l’intérieur de la structure du BAP. Les valeurs d’UPV des BAP à l’état durci dans l’eau sont

supérieures à celles obtenues sous plastique et à l'air libre, La vitesse d'impulsion la plus élevée a été atteinte pour les éprouvettes à 07 jours conservées dans l'eau d'une valeur de 4539m/s.

Le Résultat de l'essai ultrasonique est résumé ci-dessous :

Tableau 3.4 Résultat d'essai ultrasonique à 03 jours

Milieu de conservation des éprouvettes	N° de l'éprouvette	Temps T(μ s)	Vitesse V(m/s)	Moyenne Vitesse V(m/s)
Sous film plastique	01	74.40	4301	4316
	02	73.90	4330	
à l'air	03	73.90	4330	4310
	04	74.60	4290	
Dans l'eau	05	73.90	4330	4330
	06	73.90	4330	

Tableau 3.5 Résultat d'essai ultrasonique 07 jours

Milieu de conservation des éprouvettes	N° de l'éprouvette	Temps T(μ s)	Vitesse V(m/s)	Moyenne Vitesse V(m/s)
Sous film plastique	01	71.90	4451	4482
	02	70.90	4513	
à l'air	03	71.90	4451	4467
	04	71.40	4482	
Dans l'eau	05	70.90	4513	4539
	06	70.10	4565	

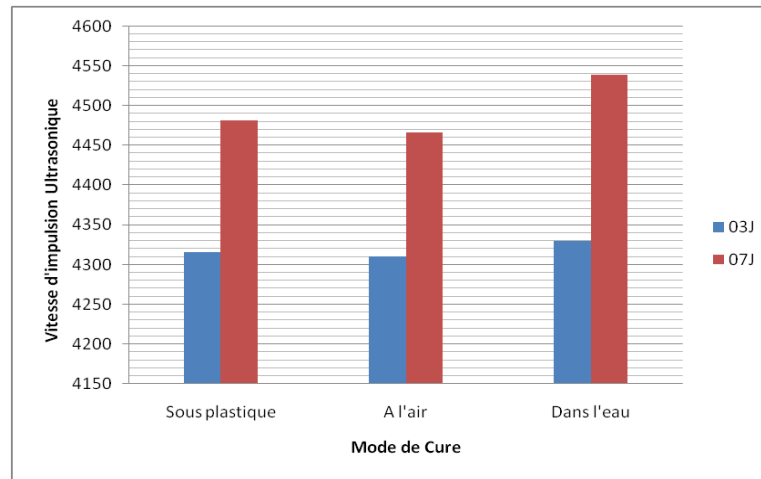


Figure 3.2 Effet de la durée et du mode de cure sur la vitesse d'impulsion ultrasonique

3.6. Résultats et interprétation corrélation UPV/RC

L'évolution dans les mesures d'UPV était similaire à celle de la résistance à la compression, UPV augmentant avec la résistance à la compression pour le mélange. Il y a une relation entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV) des éprouvettes. Les valeurs d'UPV augmentent avec la résistance à la compression les résultats similaires ont été obtenus dans des études antérieures[61].

l' expressions la plus couramment utilisés concernant la relation entre la résistance à la compression et l'UPV:

$$R_c = a \cdot e^{b \cdot P_v}$$

Rc : la résistance à la compression (Mpa), Pv : vitesse ultrasonique (m/s), a et b sont des constantes.

Nous nous somme contenté de se limiter a d'autre travaux

Estimation de la résistance du béton selon RILEM

$$R_c = 0.08177 \times e^{0.00147 \times p_v}$$

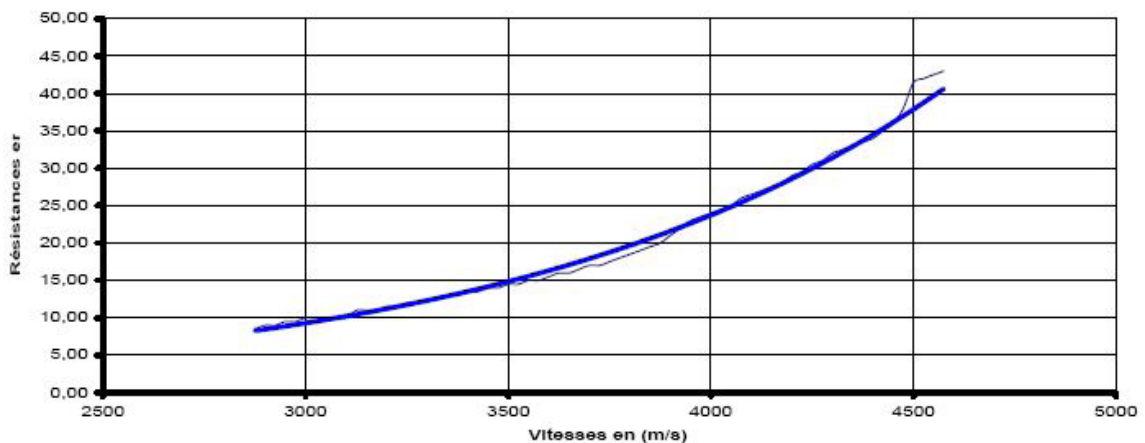


Figure3.3: Courbe RILEM

3.6.1 Classements qualitatifs :

- $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ béton de faible résistance,
- $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ béton de moyenne résistance,
- $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ béton à haute résistance,
- $V \geq 4200 \text{ m/s}$ béton à très haute résistance.

Notre BAP est classé comme matériaux à haute résistance .

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

La recherche de littérature nous a permis d'acquérir de nombreuses informations sur le béton et mortier autoplaçant qui constituent le matériau principal de cette recherche.

Le climat est parmi les facteurs primordiaux qui agissent par leur différent paramètre (température, humidité relative ensoleillement, évaporation et vent) sur le béton durant sa vie.. La nature et dosage des constituants du béton autoplaçant est aussi un paramètre non négligeable qui doit être pris en considération sur le comportement de ce dernier à l'état frais et durci.

Le ciment puisqu'il est l'agent principal dans la réaction d'hydratation, il est important dans les zones chaudes de se méfier de son utilisation. La majorité des chercheurs recommandent le bétonnage avec les ciments à faible chaleur d'hydratation et cela parce que, seule la chaleur dégagée lors de la réaction peut conduire à une élévation appréciable de la température au sein de l'ouvrage. En effet, le bétonnage en zones arides présente certains problèmes aux quels, on ne peut parfois apporter aucune solution. La chaleur excessive conduit à une accélération de la prise et le durcissement du béton, ce qui réduit son ouvrabilité et son temps de prise. Donc, toutes les précautions doivent être prises pour mettre le béton en place avant que sa vibration et son compactage ne soient une opération impossible.

Cette étude nous a permis de quantifier l'influence de certains paramètres :

- Pour l'état frais :

L'introduction du 10% de poudre de marbre de poids de ciment est un pourcentage convenablement à notre essai .

L'introduction de superplastifiant dans les compositions engendre en premier lieu à une réduction d'une quantité importante du besoin d'eau.

La compositions de BAP remplit correctement les spécifications requises à l'état frais (étalement, ségrégation dynamique et statique, stabilité).

Pour l'état durci

La conservation sous une température qui varie entre 22 et 32°C et une humidité relative entre 20 et 59% sous le film plastique est considérée comme une meilleure cure, vis à vis la résistance mécanique mieux que la conservation à l'air

L'augmentation de la durée de cure initiale dans l'eau conduit à une amélioration des résistances à la compression.

3.8 Perspectives

Au débuts des travaux de ce mémoire, l'effet de plusieurs modes de cure ,soit massique ou superficiels ,moderne ou traditionnel ont été choisi afin de testé leur influence sur les caractéristiques de deux type de BAP différent ,mais de même rapport E/P.

Ensuite, en étudiant l'effet de l'ajout et de la durée de cure sur les propriétés physico-mécaniques en climat chaud et sec réel de la région de Laghouat. Les travaux de cette recherche ont été limités à l'étude de influence de trois mode de cures bien définies et à l'évaluation de quelques propriétés physico-mécaniques à court terme, par conséquent et afin d'élucider et d'enrichir la présente étude, nous recommandons aux futures chercheurs ce qui suit :

Etude des paramètres rhéologiques sous conditions climatiques chaudes et sèches de la région de Laghouat ;

Evaluation des propriétés physico-mécaniques et durabilité en fonction de la durée de cure dans l'eau ;

Détermination d'autres caractéristiques mécaniques et physiques comme le module d'élasticité, le retrait, l'absorption par immersion et par capillarité.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] H. Okamura and M. Ouchi, "Self-compacting concrete," *Journal of advanced concrete technology*, vol. 1, pp. 5-15, 2003.
- [2] H. Okamura and M. Ouchi, "SCC Development, present use and future," in *Int. Symp. RILEM, Sztokholm, wrzesień, 1999*.
- [3] AFGC, "Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants," ed: Documents scientifiques et techniques AFGC, 2008.
- [4] M. Daimon, "Limestone powder concerning reaction and rheology," in *Proc. 4th CANMET/ACI/JCI Int'l Conf. Shigeyoshi Nagataki Symp.*, 1998, pp. 41-54.
- [5] P. K. Mehta, "Role of pozzolanic and cementitious material in sustainable development of the concrete industry," *Special Publication*, vol. 178, pp. 1-20, 1998.
- [6] P. Billberg, "Fine mortar rheology in mix design of SCC," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 47-58.
- [7] Ó. H. Wallevik and I. Nielsson, *PRO 33: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete* vol. 33: RILEM publications, 2003.
- [8] S. Nishibayashi, A. Yoshino, S. Inoue, and T. Kuroda, "Effect of properties of mix constituents on rheological constants of self-compacting concrete," in *Production Methods and Workability of Concrete*, ed: CRC Press, 2004, pp. 267-274.
- [9] H. Moosberg-Bustnes, B. Lagerblad, and E. Forsberg, "The function of fillers in concrete," *Materials and Structures*, vol. 37, p. 74, 2004.
- [10] J.-C. Mindeguia, P. Pimienta, A. Beurotte, C. La Borderie, H. Carré, and F. Anglet, "Experimental study of mechanical behaviour of high performance concrete at high temperature," in *Proceedings of the international workshop: fire design of concrete structures, from materials modelling to structural performance. University of Coimbra, Coimbra, 2007*, pp. 25-37.
- [11] O. Boukendakdji, S. Kenai, E. Kadri, and F. Rouis, "Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 2593-2598, 2009.
- [12] H. Fujiwara, S. Nagataki, N. Otsuki, and H. Endo, "A Study for Reducing Unit Powder Content of High Fluidity Concrete by Controlling Powder's Particle Size Distribution," *Doboku Gakkai Ronbunshu*, vol. 1996, pp. 67-75, 1996.
- [13] T. R. Naik, R. N. Kraus, Y.-m. Chun, F. Canpolat, and B. W. Ramme, "Use of limestone quarry by-products for developing economical self-compacting concrete," in *published at the CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Developments of Cement and Concrete, Toronto, Canada, 2005*.
- [14] V. B. Bosiljkov, "SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1279-1286, 2003.
- [15] D. Ho, A. Sheinn, C. Ng, and C. Tam, "The use of quarry dust for SCC applications," *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 505-511, 2002.
- [16] R. J. Flatt and Y. F. Houst, "A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers," *Cement and concrete research*, vol. 31, pp. 1169-1176, 2001.
- [17] T. Sugamata, Y. Edamatsu, and M. Ouchi, "A study of particle dispersing retention effect of polycarboxylate-based superplasticizers," in *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the Third International RILEM Symposium, 2003*, pp. 420-431.
- [18] B. Menadi, S. Kenai, J. Khatib, and A. Aït-Mokhtar, "Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 625-633, 2009.
- [19] H. Donza, O. Cabrera, and E. Irassar, "High-strength concrete with different fine aggregate," *Cement and concrete research*, vol. 32, pp. 1755-1761, 2002.
- [20] İ. B. Topçu and A. Uğurlu, "Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1071-1075, 2003.
- [21] I. Topoçu, "Effects of using crushed stone dust on concrete properties," in *Tenth engineering symposium, Civil Engineering'99, Suleyman Demirel University, 1999*.

Références bibliographiques

- [22] H. Okamura, K. Maekawa, and K. Ozawa, "High performance concrete," *Gihoudou Pub, Tokyo*, pp. 125-128, 1993.
- [23] P. Domone and J. JIN, "Properties of mortar for self-compacting concrete," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 109-120.
- [24] Y. Edamatsu, T. Sugamata, and M. Ouchi, "A mix-design method for self-compacting concrete based on mortar flow and funnel tests," in *International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 2003, pp. 345-354.
- [25] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, and E. Özbay, "Effects of marble powder and slag on the properties of self compacting mortars," *Materials and Structures*, vol. 42, pp. 813-826, 2009.
- [26] J. Carlswald, M. Emborg, S. Utsi, and P. Oberg, "Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete," in *Proceeding of the Third international RILEM conference on SCC, Island, Proceedings PRO*, 2003, pp. 143-153.
- [27] B. Felekoğlu, K. Tosun, B. Baradan, A. Altun, and B. Uyulgan, "The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars," *Cement and concrete research*, vol. 36, pp. 1719-1726, 2006.
- [28] W. Zhu and J. C. Gibbs, "Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1457-1462, 2005.
- [29] C. F. Ferraris, K. H. Obla, and R. Hill, "The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete," *Cement and concrete research*, vol. 31, pp. 245-255, 2001.
- [30] J. Benezet and A. Benhassaine, "The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder," *Powder Technology*, vol. 103, pp. 26-29, 1999.
- [31] Y. SHI, Y. TANIGAWA, H. MORI, and Y. KUROKAWA, "A STUDY ON EFFECT OF SUPERFINE POWDERS ON FLUIDITY OF CEMENT PASTE," *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol. 20, pp. 9-14, 1999.
- [32] R. Krachaï, M. Bouabdallah, H. Belhadi, and K. Hamou, "Influence de la Pouzzolane de Béni-Saf sur les performances mécaniques des bétons autoplaçants," in *1st International conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET, Oran, Algeria*, 2009.
- [33] Y. W. Choi, Y. J. Kim, H. C. Shin, and H. Y. Moon, "An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 1595-1602, 2006.
- [34] E. Sudo, Y. Masuda, and S. Gomi, "The influence of fine aggregate grading on workability of high-fluidity concrete," *Japan Concrete Institute Journal*, vol. 18, pp. 123-128, 1996.
- [35] Y. Edamatsu, A. Yasumoto, M. Mizukoshi, and S. Nagaoka, "Influence of sand or gravel volume on self-compactability of fresh concrete," *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, vol. 19, 1997.
- [36] P. Domone, "Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies," *Cement and concrete composites*, vol. 28, pp. 197-208, 2006.
- [37] H. Müller, V. Mechtcherine, and M. Haist, "Development of self-compacting lightweight aggregate concrete," in *The 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. COMS Engineering Corporation*, 2001, pp. 737-742.
- [38] T.-Y. Tu, Y.-Y. Jann, and C.-L. Hwang, "The application of recycled aggregates in SCC," in *Proceedings of the First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Changsha, China*, 2005, pp. 145-152.
- [39] S. Bethmont, "Mecanismes de segregation dans les betons autoplaçants (BAP): Etude experimentale des interactions granulaires," *THESE DE DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES, SPECIALITE: STRUCTURES ET MATERIAUX*, 2005.
- [40] J. Yammine, "Rhéologie des bétons fluides à hautes performances: relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques," 2007.
- [41] H. Okamura and K. Ozawa, "Mix design for self-compacting concrete," *Concrete library of JSCE*, vol. 25, pp. 107-120, 1995.

Références bibliographiques

- [42] H. Okamura and K. Ozawa, "Mix Design Method for SCC," *Concrete Library of JSCE*, vol. 25, pp. 107-120, 1995.
- [43] P. Turcry, "Retrait et Fissuration des Betons Autoplaçants," *Influence de la Formulation. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes*, 2004.
- [44] T. Sedran, "Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants," *École nationale des ponts et chaussées (France)*, 1999.
- [45] J. Jin, "Properties of mortar for self-compacting concrete," *University of London*, 2002.
- [46] M. Ouchi and Y. Edamatsu, "A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 121-130.
- [47] F. Jacobs and F. Hunkeler, "Design of self-compacting concrete for durable concrete structures," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 397-407.
- [48] S. Oh, T. Noguchi, and F. Tomosawa, "Toward mix design for rheology of self-compacting concrete," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 361-372.
- [49] S. Tangtermsirikul and V. Bui, "Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete," in *Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil thailand engineering*, 1995, pp. 58-69.
- [50] B. Van Khanh and D. Montgomery, "Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 373-384.
- [51] G. Chanvillard and O. Basuyaux, "A method for formulating sand concretes having specified workability and strength values," *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1996.
- [52] J. BARON, *Les bétons-bases et données pour leur formulation*, 1996.
- [53] T. Sedran and F. De Larrard, "Manuel d'utilisation de RENE-LCPC, version 6.1 d, logiciel d'optimisation granulaire," *Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées*, 2000.
- [54] T. T. Roshavelov, "Concrete mixture proportioning with optimal dry packing," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 385-396.
- [55] K. Khayat, A. Ghezal, and M. Hadriche, "Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete," *Materials and structures*, vol. 33, pp. 338-344, 2000.
- [56] M. R. Valluzzi and R. Magazine, "Latest News," 2005.
- [57] B. Pedersen and S. Smeplass, "The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase," in *Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland*, 2003, pp. 106-16.
- [58] S. Samarakoon, Ø. S. Vie, and R. K. Fjellidal, "Self-Compacting White Concrete Mix Design Using the Particle Matrix Model," *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, vol. 9, pp. 802-806, 2015.
- [59] M. Regourd and L. L'hydratation du ciment Portland, "Le béton hydraulique," *chapitre «L'eau», Presse de l'ENPC*, pp. 59-68, 1982.
- [60] T. NOGUCHI, S. Oh, and F. TOMOSAWA, "Rheological approach to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 59-70.
- [61] M. Salhi, A. Li, and M. Ghrici, "Effets du mode de cure sur le comportement des bétons autoplaçants," *Academic Journal of Civil Engineering*, vol. 34, pp. 687-694, 2016.
- [62] M. Nematollahzade, A. Tajadini, I. Afshoon, and F. Aslani, "Influence of different curing conditions and water to cement ratio on properties of self-compacting concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 237, p. 117570, 2020.
- [63] F. De Larrard and R. Le Roy, "Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances," *Materials and structures*, vol. 25, pp. 464-475, 1992.
- [64] M. LORRAIN, "EXTENSION DU DOMAINE D'APPLICATION DES REGLEMENTS DE CALCUL BAEL/BPEL AUX BETONS A 80 MPa-JUSTIFICATIONS SCIENTIFIQUES DES PROPOSITIONS

Références bibliographiques

- AVANCEES-ADHERENCE ET FISSURATION DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES," *BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES*, 1996.
- [65] F. De Larrard, *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*: CRC Press, 1999.
- [66] J. Pera, S. Husson, and B. Guilhot, "Influence of finely ground limestone on cement hydration," *Cement and Concrete Composites*, vol. 21, pp. 99-105, 1999.
- [67] J. Gibbs and W. Zhu, "Strength of hardened self compacting concrete," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 199-209.
- [68] M. Sonebi and P. M. Bartos, "Hardened SCC and its bond with reinforcement," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 275-289.
- [69] O. Petersson, "Limestone powder as filler in self-compacting concrete-frost resistance and compressive strength," in *Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, 2001*, pp. 277-284.
- [70] B. Felekoglu, M. Y. Yardimci, and B. Baradan, "A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete," in *Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland, 2003*, pp. 446-456.
- [71] C. Shi, Y. Wu, Y. Shao, and M. Riefler, "Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete," in *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM Center, 2002*, pp. 349-354.
- [72] O. Petersson, J. Gibbs, and P. Bartos, "Testing-SCC: a european project," in *Selfcompacting concrete, third international RILEM symposium, Reykjavik, Iceland, 2003*, pp. 299-304.
- [73] Y. Klug and K. Holschemacher, "Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete," in *3rd RILEM symposium on self compacting concrete, Reykjavik, 2003*, pp. 596-605.
- [74] E. Güneysi and M. Gesoğlu, "A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag," *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 479-493, 2008.
- [75] B. Persson, "A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete," *Cement and concrete Research*, vol. 31, pp. 193-198, 2001.
- [76] G. Pons, E. Proust, and S. Assié, "Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete," in *Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete, 2003*, pp. 17-20.
- [77] Y. Klug and K. Holschemacher, "Material properties of hardened self-compacting concrete," in *Proceedings of the International Conference on Performance of Construction Materials in the New Millennium a New Era of Building, Cairo, Egypt, 2003*, p. 20.
- [78] M. Bouasker, F. Grondin, P. Mounanga, and A. Khelidj, "Retrait chimique des mortiers au très jeune âge: influence des inclusions granulaires," *XXIVèmes RUGC-Construire: les nouveaux défis, 1&2 juin 2006, La Grande Motte, 2006*.
- [79] F. Wittmann, "On the action of capillary pressure in fresh concrete," *Cement and concrete research*, vol. 6, pp. 49-56, 1976.
- [80] Y. Boucheneb, "Retrait plastique des bétons autoplçants," Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [81] P.-C. Aitcin, A. Neville, and P. Acker, "Les différents types de retrait du béton," *Bulletin-Laboratoires des ponts et chaussees*, pp. 41-52, 1998.
- [82] N.-K. Brixi, "Etude du retrait des bétons autoplçants," 2014.
- [83] B. Persson, "Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete," in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 239-250.
- [84] T. Ayano, "Durability of Self-Compacting and Low Heat High Performance Concrete," *Concrete under Severe Conditions-CONSEC'98*, vol. 3, pp. 2057-2064, 1998.
- [85] A. N. Neville, *Propriétés des bétons*: Eyrolles, 2000.
- [86] É. Bédard, "Influence de la température sur le comportement au jeune âge du béton," 2009.

Références bibliographiques

- [87] K. Lahlou and P.-C. Aïtcin, "Colonnes en béton à hautes performances confiné dans des enveloppes minces en acier," *Bulletin des Laboratoires de Ponts et Chaussées*, pp. 49-67, 1997.
- [88] L. Divet, "Les réactions sulfatiques internes au béton: contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite," *ETUDES ET RECHERCHES DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES-SERIE OUVRAGES D'ART*, 2001.
- [89] A. Haouas, "Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires—caractérisation et modélisation chimio-hydro-mécanique du retrait," 2007.
- [90] N. BOUHAMOU, N. BELAS, A. MEBROUKI, H. MESBAH, and Y. AMMAR, "Étude de l'influence des paramètres de composition sur le comportement à l'état frais du béton autoplaçant à base de matériaux locaux," *Doctorat d'État, Université de Mostaganem, Algérie*, 2004.
- [91] J. Jin and P. Domone, "Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component," 2002.
- [92] S. E. Bensebti, "Formulation et propriétés des autoplaçants à base de matériaux locaux," 2008.
- [93] A. EFNARC, "Specifications and Guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock," ed, 2005.
- [94] H. Y. Qasrawi, "Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted," *Cement and concrete research*, vol. 30, pp. 739-746, 2000.
- [95] H. Zhao, W. Sun, X. Wu, and B. Gao, "Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concrete," *Materials & Design*, vol. 35, pp. 194-200, 2012.