

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGI  
DEPARTEMENT : GENIE CIVIL



DOMAINE : GENIE CIVIL  
FILIERE : GENIE CIVIL  
OPTION : MATERIAUX

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par : HADJERSI Fouad

BENZEOUAD Oualid

## THEME

**Caractérisation rhéologique d'un  
béton auto plaçant (BAP) à base de  
fumée de silice**

Soutenu devant le jury composé de:

Pr. NASRI A/Ghani	Université M'SILA	Président
Dr. BELAGRAA Larbi	Université M'SILA	Rapporteur
Pr. BEDDAR Miloud	Université M'SILA	Co-Rapporteur
Dr. MEDDAH A/Aziz	Université M'SILA	Examineur
Dr. SILINE Mohamed	Université M'SILA	Examineur

Promotion : 2017/2018.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

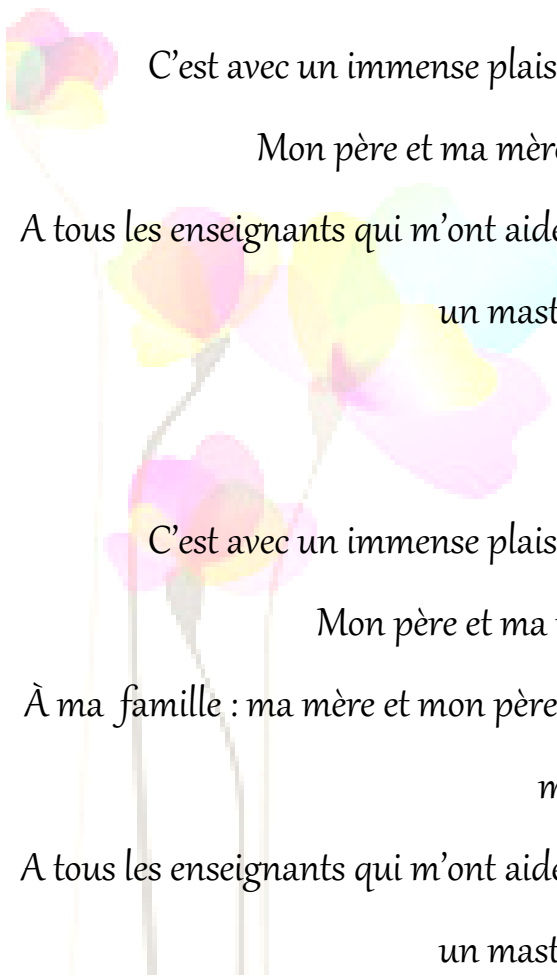
A decorative flourish consisting of two symmetrical, flowing lines that curve upwards and outwards from the center. The lines are colored in a gradient from purple at the top to red at the bottom, with a yellow diamond-shaped element at the very center.

# *Remerciement*

La Première chose on remercie le Dieu pour le succès Qu'il nous a donné, la volonté et la patience tout au long de la période d'étude.

En second lieu nous remercions aussi notre encadreur **Mr. BELAGRAA Larbi**, et Co-Encadreur **Mr. BEDDAR Miloud** et **Mr. KESSAL Oussama** pour l'orientation, la confiance. et la patience tout long de ce travail. Nous tenons à remercier vivement toute personne qui a aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à accomplir ce travail et tous les employés du laboratoire de génie civil à l'université de  
Mohamad Elbachir Elibrahimi.

# ***Dédicace***



C'est avec un immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :

Mon père et ma mère. A mes frères et mes sœurs

A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un jour avec  
un master en génie civil

***Hadjersi Fouad***

C'est avec un immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :

Mon père et ma mère. Je dédie ce travail,

À ma famille : ma mère et mon père. À mes amis et à tous ceux que j'aime et qui  
m'aiment.

A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un jour avec  
un master en génie civil

***Benzeouad Oualid***

# Sommaire

## **Introduction générale**

1. Introduction .....	1
2. Problématique.....	1
3. Objectifs .....	2
3. Structure .....	2

## **Chapitre I : Généralités sur le béton autoplaçant**

I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition de béton autoplaçant .....	4
I.3 Domaine d'utilisation des BAP.....	4
I.4 Les principaux constituants d'un béton autoplaçant : .....	5
I.4.1 Le ciment : .....	5
I.4.2 Les granulats .....	6
I.4.3 L'eau : .....	7
I.4.5 Les adjuvants : .....	9
I.5. Méthode de formulation pratique des BAP :.....	9
I.5.1. Approche japonaise.....	10
I.5.2 Approche LCPC (laboratoire central de ponts et chaussées): .....	10
I.5.3 Approche CBI (suédoise).....	11
I.6 Caractérisation d'un béton autoplaçant.....	11
I.6.1 Caractérisation des BAP à l'état frais : .....	11
I.6.2 Caractérisation des bétons Autoplaçants à l'état durci : .....	13
I.7 Propriétés physico-chimiques et durabilité d'un BAP .....	14
I.7.1 Carbonatation : .....	14
I.7.2 Absorption capillaire : .....	14
I.8 Mode d'action de la fumée de silice : .....	15
I.8.1. L'effet pouzzolanique : .....	15
I.8.2. L'effet granulaire: .....	16
I.9. Caractéristiques des fumées de silice : .....	16
I.10. Les formes de la fumée de silice : .....	16
I.11. Dosage de la fumée de silice dans le béton :.....	17
I.12. Rôle de la fumée de silice dans le béton frais : .....	17
I.13. Rôle de la fumée de silice dans le béton durci : .....	17
I.14. Avantages de la fumée de la silice : .....	18
I.14.1. Sur la maniabilité et durabilité [32] : .....	18
I.14.2. Sur la Performances mécaniques [32] : .....	18
I.15 Comportements rhéologiques.....	19
I.16 Quelques définition .....	20
I.17 Rhéomètres : .....	21

I.18 Paramètres rhéologique :	22
I.19 Conclusion :	23

## **Chapitre II : Les essais destructifs et non destructifs**

II.1 Introduction :	24
II.2. Essais destructifs sur le béton	24
II.2.1. Essai de compression	24
II.2.2. Essai de traction par fendage : [NA EN 12390-6]	25
II.2.3. Module d'élasticité statique (Ei):	25
II.3. Essais non destructifs sur le béton	26
II.3.1 Essais scléromètre [NA EN 12504-2]	26
II.3.2. Essais ultrason [NA EN 12504-4]	27
II.3.3. La méthode combinée :	27
II.4 Conclusion :	28

## **Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés**

III.1 Introduction:	29
III.2 Les matériaux utilisés sont :	29
III. 3 Caractéristiques du sable utilisé :	29
III.3.1 Analyse granulométrique : [NA EN 933-5]	29
III.3.2 Caractéristiques physiques de sable utilisé(Bousaada) :	30
III.3.2.1 Masse spécifique (absolue) : [NA EN 933-5]	30
III.3.3 Caractéristique chimique du sable :	34
III.4 Caractéristique du gravier utilisé :	34
III.4.1 Origine du gravier utilisé :	34
III.4.2. Analyse granulométrique [NA EN 933-5]	35
III.4.3. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés :	36
III.4.4 Caractéristiques mécanique des graviers utilisés :	38
III.4.5 Caractéristiques chimiques des graviers utilisés :	39
III.5 CIMENT :	39
III.5.1 Caractéristiques du ciment CEM II/B 42,5 :	39
III.6. Le Fillers de calcaire :	40
III.6.1 Caractéristique physique et chimiques du calcaire :	40
III.7 La fumé de silice :	41
III.7.1. Caractéristiques chimiques et physiques de la fumée de silice:	41
III.8 Les Adjuvants :	41
III.8.1 Description :	42
III.8.2 Propriétés :	42
III.9. L'eau de gâchage : [EN 1008]	42
III.10 Conclusion :	43

## **Chapitre IV: Techniques Expérimentales**

IV.1 Introduction :	44
IV.2 Formulation du béton autoplaçant :	44

IV.2.1 Méthode Française :	44
IV.3 Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC :	45
IV.4 Procédure de fabrication des éprouvettes :	47
IV.5 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais :	48
IV.5.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams [NFEN12 350-8]	48
IV.5.2 Essai de la boîte en « L »: [NF EN 12 350-10]	48
IV.5.3 Essai de stabilité au tamis:[NF EN 12 350-11]	48
IV.5.4 Essai Rhéomètre	49
IV.6 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci :	49
IV.6.1 Essai compression [EN 206-1]	49
IV.6.2 Essai de traction par fendage : [NA EN 12390-6]	50
IV.6.3 Module d'élasticité statique (Ei):	50
IV.6.4 Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NA EN 12504-2]	50
IV.6.5 Ultrason [NA EN 12504-4]	51
V.7. Essai pour la durabilité :	51
IV.7.1 Mesure le taux d'absorption d'eau [NA EN 1097]	51
IV.8. Confection des éprouvettes :	52
IV.8.1 Type et tailles des moules :	52
IV.8.2 Conservation des éprouvettes :	52
IV.9 Conclusion :	52

### **Chapitre V : Résultats et Analyses**

V.1 Introduction :	53
V.2 Les formulations des bétons réalisés sont les suivantes :	53
V.3 Présentation de résultats :	53
V.3.1 Résultats des essais à l'état frais :	53
V.3.1.1 Valeurs du seuil de cisaillement et de viscosité à bas de fumé de silice et filler de calcaire :	56
V.3.2 Caractérisation des bétons a l'état durci :	60
V.4 Module d'élasticité statique	63
V.5 Essais non destructifs (END)	64
V.6. Essai pour la durabilité :	66
V.6.1. L'absorption	66
V.7 Conclusion :	67

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre I : Généralités sur le béton autoplaçant**

Tableau I.1. Les principales grandeurs caractéristiques de la fumée de silice. ....	16
Tableau. I.2 ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents type de matériau, : ....	23

### **Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés**

Tableau III.1: Analyse granulométrique du sable (sable de Boussaâda).....	29
Tableau III.2: Masse volumique absolue du sable. ....	31
Tableau III.3: Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche. ....	31
Tableau III.4: Masse volumique apparente du sable à l'état compact.....	32
Tableau III.5: La porosité, la compacité et l'indice de vide Pour le sable .....	32
Tableau III.6: Equivalent du sable.....	33
Tableau III.7: La classification de la nature sable en fonction d' $E_s$ .....	33
Tableau III.8: Teneur en eau du sable .....	34
Tableau III.9: Les Caractéristiques chimique du sable.....	34
Tableau III.10 : Analyse granulométrique du gravier (3/8).....	35
Tableau III.11 : Analyse granulométrique du gravier (8/16).....	35
Tableau III.12: Masse volumique apparente du gravier. ....	35
Tableau III.13: Masse volumique absolue du gravier. ....	37
Tableau III.14 : Porosité, compacité et l'indice des vides.....	37
Tableau III.15: Teneur en eau du gravier .....	38
Tableau III.16: Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé. ....	38
Tableau III.17 : Classification des roches en fonction du coefficient $L_A$ .....	39
Tableau III.18 : Analyse chimique du gravier.....	39
Tableau III 19: Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5. ....	40
Tableau III.20 Les composition chimique du CEM II/B 42.5 :.....	40
Tableau III.21 Les composition minéralogique du ciment CEM II/B 42.5 :.....	40
Tableau III.22: La composition chimique et les propriétés physiques du filler calcaire.....	41
Tableau III.23 Les Caractéristiques chimiques et physiques de la fumée de silice.....	41
Tableau III.24 : Caractéristique de l'adjuvant« MEDAFLOW 30 ». ....	42
Tableau III.25 : Propriétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci. ....	42
Tableau III.26: Analyse chimique de l'eau utilisée. ....	43

## **Chapitre IV : Techniques Expérimentales**

Tableau IV.1 : Dosage de superplastifiant de la masse de ciment et filler :.....	45
Tableau IV.2 : Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode AFGC : .....	46

## **Chapitre V : Résultats et Analyses**

Tableau V.1 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec fumé de silice et fillers de calcaire.....	54
Tableau V.2 écoulement des point de BAP+10% FC .....	56
Tableau V.3 écoulement des point de BAP+10% FS.....	57
Tableau V.4 écoulement des point de BAP+5% FS et 5%FC.....	57
Tableau V.5 écoulement des point de BAP+2,5%FS et 7,5% FC.....	58
Tableau V.6 écoulement des point de BAP+2,5%FC et 7,5% FS.....	58
Tableau V.7 Caractéristiques rhéologique des différents BAP avec FC et FS mesurées par rhéomètre. .....	59
Tableau V.8: La résistance à la traction par fendage des BAP étudiés (R <sub>t</sub> ). .....	61
Tableau V.9 : La résistance à la compression des BAP étudiés à 7, 14 et 28 jours.....	62
Tableau V.10 : Résultats du module d'élasticité des BAP étudiés.....	63
Tableau V.11 Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP étudiés à 28 jours.....	64
Tableau V.12: Résultat de l'absorption capillaire (A) pour les BAP étudiés.....	66

# **Liste des figures**

## **Chapitre I : Généralités sur le béton autoplaçant**

Figure I.1 : Différence entre les BAP et les BO. [4] .....	5
Figure I.2 : L'effet du superplastifiant sur les grains de ciment.....	10
Figure I.3 : Essai d'étalement.....	12
Figure I.4: boîte en L.....	13
Figure I.5: Essai de la stabilité au tamis .....	13
Figure I.6 Appareil rhéomètre .....	14
Figure I.7 : Les grains de la fumée de silice par (MEB) [30].....	15
Figure I.8 : Les différentes formes de la fumée de silice [32].....	17
Figure I.9 Classification des fluides selon leur comportement rhéologique [36,37].....	20
Figure .I.10 Vue générale du rhéomètre [41,42] .....	22

## **Chapitre II : Les essais destructifs et non destructifs**

Figure II.1 Mesure la résistance à la compression. ....	25
Figure II.2 Mesure la résistance à la traction par fendage.....	25
Figure II.3 Appareil scléromètre .....	26
Figure II.4 Mesure sur éprouvette cylindrique.....	26
Figure II.5: Appareil ultrason.....	27

## **Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés**

Figure III.1 : Courbe d'analyse granulométrique de sable Bousaada.....	30
Figure III.2 : Essai équivalent de sable exécuté au laboratoire. ....	32
Figure.III.3.Courbe Analyse granulométrique de gravier 3/8. ....	35
Figure.III.4.Courbe Analyse granulométrique de gravier 8/16. ....	36
Figure III.5: Appareil de l'essai Los Angeles .....	38

## **Chapitre IV : Techniques Expérimentales**

Figure IV.1 : Malaxeur à béton laboratoire de GC.....	47
Figure IV.2 : Essai au cône d'Abrams .....	48
Figure IV.3 : Essai de boit en L.....	48
Figure IV.4 : Essai au tamis. ....	48

Figure IV.5 Essais rhéomètre .....	49
Figure IV.6: Essai compression.....	49
Figure IV.: Essai de traction par fendage .....	49
Figure IV.8 : Principe de l'essai scléromètre. ....	50
Figure IV.9: Appareil ultrason .....	51
Figure IV.10: Conservation des éprouvettes .....	52

### **Chapitre V : Résultats et Analyses**

Figure V.1 : L'étalement en fonction du type de béton. ....	54
Figure V.2: Le taux de remplissage en fonction du type de béton (Boite en L).....	55
Figure V.3:L'indice de ségrégation dynamique en fonction du type de BAP. ....	56
Figure. V4. Courbe d'écoulement des points de BAP+10% FC .....	57
Figure. V5. Courbe d'écoulement des points de BAP+10% FS.....	57
Figure. V.6 Courbe d'écoulement des points de BAP+5% FS et 5%FC .....	57
Figure. V.7 Courbe d'écoulement des points de BAP+2,5%FS et 7,5% FC .....	58
Figure. V.8 Courbe d'écoulement des points de BAP+2,5%FC et 7,5% FS .....	59
Figure. V.9 Valeur de seuil de cisaillement et de la viscosité des BAP.....	59
Figure V.10: Évolutions de la Résistance à la traction par fendage en fonction de l'âge du béton ..	61
Figure V.11 : Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton. ....	62
Figure V.12: Module d'élasticité en fonction du type de BAP à 28 jours .....	63
Figure V.13: Evaluation de l'indice sclérométrique pour les BAP étudiés.....	65
Figure V.14: Vitesse ultrason en fonction du type de BAP .....	65
Figure V.15: L'absorption (A) des différents BAP étudiés.....	66

## Résumé

Les bétons auto plaçants se distinguent par une forte fluidité, permettant leur mise en place sans vibration. Les additions minérales et les adjuvants sont deux composants indispensables pour la formulation des bétons auto plaçants (BAP); ce sont les deux composants qui régissent le comportement rhéologique de ces bétons. Les additions minérales sont introduites dans les bétons pour améliorer leur comportement rhéologique à l'état frais, mais aussi pour participer aux propriétés mécaniques et de durabilité des bétons, notamment dans le cas d'ajouts actives.

Dans cette étude, un programme d'essais a été effectué sur des bétons auto plaçants composés de ciment et d'ajouts ménagers, la fumée de silice et filler de calcaire comme additions minérales. La série d'essais a été réalisée à l'aide des méthodes basées sur des essais d'ouvrabilité (étalement, boîte en L et essais de stabilité aux tamis) pour déterminer les paramètres rhéologiques la fluidité, ainsi que le seuil de cisaillement et la viscosité à l'aide du rhéomètre à l'état frais. Une caractérisation mécanique a lieu aux moyens des méthodes direct (écrasement) et non destructifs (ultrason scléromètre) pour l'évaluation de la réponse mécanique à l'état durci.

Les résultats obtenus montrent un effet avantageux de ces additions combinées à un dosage optimal de 10%, quant à l'amélioration des propriétés rhéologique et physico-mécaniques des bétons autoplaçants étudiés.

**Mots clés :** Bétons auto plaçant, paramètres rhéologiques la viscosité.

## **ABSTRACT**

The self-compacting concretes are distinguished by an extreme fluidity, allowing their placement without vibration. Mineral additions and admixtures are two essential components for the formulation of self-placing concretes (SCC); these are the two components that govern the rheological behavior of such concrete. The mineral additions are introduced into the concrete to improve their rheological behavior in the fresh state, but also to participate in enhancing the mechanical properties and durability of concretes, especially in the case active additives.

In this study, a test program was carried out on self-placing concretes composed of cement and silica fume and lime filler as mineral addition. The series of tests were carried out using methods based on workability tests (Flow table, L-box and sieve stability tests) to determine the rheological parameters, mainly the fluidity, the shear threshold and the viscosity using the remoter in the fresh state. Mechanical characterization takes place by means of the direct (compressive) and non-destructive methods (ultrasonic velocity and rebound hammer) for the evaluation of the mechanical response in the hardened state.

The results obtained show an advantageous effect of these additions combined with an optimal dosage of 10%, with regard to the improvement of the rheological and physico-mechanical properties of the self-compacting concretes studied.

**Key words:** Self setting concretes, rheological parameters viscosity.

## ملخص:

تتميز الخرسانة ذاتية التوضع بسيولة عالية, مما يسمح بوضعها دون اهتزاز. الإضافات المعدنية والمواد المساعدة مكونين أساسيين لصياغة الخرسانة ذاتية التوضع, هذه المكونات تتحكم في السلوك الانسيابي للخرسانة. يتم إدخال الإضافات المعدنية في الخرسانة لتحسين سلوكها الانسيابي في الحالة الجيدة وتعزيز الخواص الميكانيكية ومتانة الخرسانة, خاصة في حالة المواد المضافة النشطة.

في هذه الدراسة تم تنفيذ برنامج اختبار على الخرسانة ذاتية التوضع المتكونة من الاسمنت وأبخرة السيليكات وحببيات الجير كإضافات معدنية , أجريت سلسلة من الاختبارات باستخدام طرق تعتمد على قابلية التشغيل (جدول التدفق, اختبار الثبات, واختبار غربال), لتحديد معايير الانسيابية خاصة السيولة وعتبة القص واللزوجة باستخدام النائية في الحالة الجيدة يحدث التوصيف الميكانيكي عن طريق الطرق المباشرة (الانضغاط) , وغير المدمرة (سرعة الموجات فوق الصوتية ومطرفة الارتداد), تقييم الاستجابة الميكانيكية في الحالة المتصلبة.

تظهر النتائج المحصل عليها تأثير مفيد لهذه الإضافات جنباً إلى جنب مع الجرعة المثلى 10% فيما يتعلق بتحسين الخصائص الانسيابية والفيزيائية والميكانيكية للخرسانة ذاتية الخلق المدروسة.

**المفاتيح :** خرسانة ذاتية التوضع, غبار السيلس, الخصائص الفيزيائية و الانسيابية , اللزوجة.

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

### **1. Introduction**

Le béton auto plaçant caractérisé par une forte fluidité, est un béton qui se met en place sans aucune vibration même dans des endroits très encombrés par le ferrailage et cela tout en préservant une bonne homogénéité jusqu'à sa durabilité. La grande maniabilité des BAP assure la fabrication d'ouvrages duquel la finition est toujours d'une bonne qualité. Cette fluidité peut être obtenue par l'utilisation de super plastifiant pour éviter la ségrégation. Les bétons auto plaçant (BAP), développés depuis les années 80, sont encore à l'heure actuelle qualifiés de nouveaux bétons est bien qu'ils connaissent un développement très appréciable. Les bétons auto plaçant se différencient de béton ordinaire par l'utilisation de fortes quantités en additions minérales, de super plastifiant. Ces bétons se distinguent également par leurs propriétés à l'état frais et leur mode de mise en œuvre.

### **2. Problématique**

Les bétons d'aujourd'hui sont souvent composés d'additions minérales. C'est dans cette optique, que s'inscrit notre sujet de recherche qui s'articule sur la conception et la caractérisation des bétons auto plaçants (BAP) avec ajouts (Calcaire et fumée de silice), fabriqués à partir d'une gamme de constituants disponibles localement (contexte algérien). En fait, le mémoire consiste en l'étude de la formulation de ce type de béton ainsi qu'une investigation sur l'exploitation d'un certain nombre d'ajouts cimentaires. Cette présence a des effets sur le comportement des pâtes cimentaires et donc le comportement rhéologique du béton et toutes les propriétés afférentes.

Dans cette étude on s'intéresse au comportement d'un béton auto plaçant (très fluides). Nous avons alors étudié l'influence du dosage de l'addition (Calcaire et fumée de silice) à un pourcentage variable 0, 2,5, 5, 7.5 et 10 % simultanément pour les deux ajouts. Egalement, l'effet de ce dosage de calcaire et fumée de silice sur leur comportement rhéologique (étalement, seuil de cisaillement et viscosité plastique) d'un BAP à base de ces additions à l'état frais ; ainsi, leur influence sur les caractéristiques physico-mécaniques ont été pris en considération.

### **3. Objectifs**

L'étude réalisée comporte deux étapes. Pour la première, les propriétés d'écoulement au moyen du mini-cône et du cône de Marsh sont quantifiées pour déterminer la demande en eau des additions en suspension dans l'eau et pour déterminer la demande en super plastifiant en présence de ciment, en fonction du dosage des additions. La deuxième campagne expérimentale s'appuie sur les résultats de la première étape pour caractériser l'écoulement de la matrice cimentaires complètes (ciment + addition + eau + super plastifiant + agrégats ) à travers les essais d'ouvrabilité déjà utilisés (essais de cône d'Abrams et boîte en L), des mesures de paramètres rhéologiques (seuil statique et viscosités apparentes) à l'aide d'un rhéomètre ont été ainsi concrétisées, afin de :

- Voir l'effet des additions sur les propriétés rhéologiques ;
- Voir L'effet des additions sur les propriétés physico-mécaniques de ces bétons.

Une corrélation entre les résultats d'essais empiriques et les valeurs mesurées à l'aide du rhéomètre est étudiée.

### **4. Structure de mémoire :**

Ce mémoire est composé de Cinq chapitres qui sont les suivants :

Introduction générale, Problématique, Objectifs et structure de mémoire.

**Chapitre I :** La première partie de ce chapitre est consacrée aux connaissances actuelles des propriétés des BAP. Les méthodes de caractérisation des différentes propriétés de ces bétons sont présentées ainsi que le rôle des paramètres de composition permettant d'obtenir des matériaux extrêmement fluides et stables.

La deuxième partie contient des notions générales sur les fumées de silice et leur influence sur les bétons spécialement le BAP.

La troisième partie est consacrée aux conceptions de base de la rhéologie avec les définitions des paramètres rhéologiques et des types de comportement rhéologique, ainsi que l'influence des constituants du mélange sur la rhéologie du béton frais. la rhéologie dans le cas des bétons s'est pendant longtemps limitée à des tests simples (étalement, affaissement, etc.). Mais depuis l'apparition des bétons fluides il est très important de faire des études plus profondes grâce à des rhéomètres.

**Chapitre II :** Notions générales sur les essais destructifs et non destructifs.

**Chapitre III :** Le troisième chapitre présente les matériaux, les outils et méthodes utilisées pour la réalisation de cette étude.

**Chapitre IV :** Le quatrième chapitre traite de la mise en évidence de l'effet des additions sur l'écoulement de ces bétons. Une étude rhéologique au rhéomètre permet de souligner l'influence des additions minérales et permet de quantifier les paramètres rhéologiques et le comportement de nos BAP.

**Chapitre V :** Résultats et discussion, présente les résultats expérimentaux obtenus et les interprétations déduites.

Enfin, une conclusion générale achève cette étude et récapitule les conclusions essentielles tirées après interprétation des résultats obtenus des différents bétons testés.

# **Généralités sur le béton autoplaçant**

## Généralités sur le béton autoplaçant

### I.1 Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP, ou SCC, en anglais, self compacting concrete) ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores [1]. Ces bétons se développent maintenant en Europe et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : possibilité de bétonner des zones fortement ferrillées ou à géométrie complexe et obtention d'une meilleure qualité du parement (pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers) d'une part, diminution du temps et de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels, d'autre part.

### I.2 Définition de béton autoplaçant

Les bétons autoplaçants sont des bétons très fluides qui se mettent en place par gravitation sans apport extérieur ou intérieur de vibration. Le béton n'est qualifié d'autoplaçant que si le matériau final présente des propriétés homogènes c'est à dire n'ayant pas subi de ségrégation.

La dénomination des bétons autoplaçants et pour certains chercheurs se distingue:

- Le premier terme est employé lorsqu'il s'agit d'un coulage vertical alors que le second correspond à une mise en œuvre horizontale (dallage).

D'autres expressions sont aussi utilisées, (béton autoplaçable, béton très fluide ou béton auto nivelant), ces bétons présentent les propriétés suivantes:

- Absence de vibration ce qui réduit les nuisances sonores.
- Bétonnage de zones fortement ferrillées.
- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Qualité des parements, etc. [2]

### I.3 Domaine d'utilisation des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [3]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés

en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation des structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- densités de ferrailage importantes.
- formes et géométries complexes : voiles, courbes.
- voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts.
- voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- exigences architecturales et qualité de parement particulière.

#### I.4 Les principaux constituants d'un béton autoplaçant :

Les constituants d'un BAP sont le ciment, les fines (les ajouts minéraux), les granulats (sable, gravier), eau et les adjuvants chimiques (superplastifiant). Voir schéma suivant (**figure I.1**).

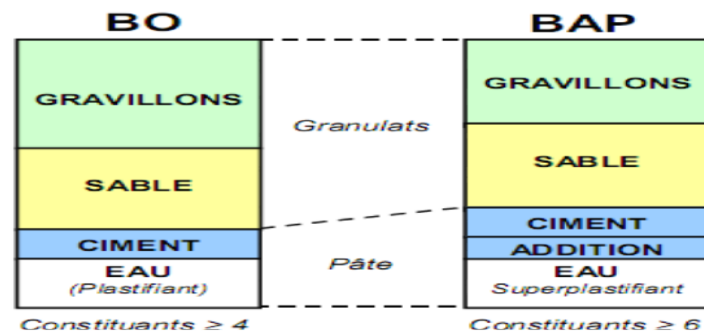


Figure I.1 : Différence entre les BAP et les BO. [4]

##### I.4.1 Le ciment :

Le ciment conforme à la norme **NF EN 197-1**, appelé ciment **CEM**, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisant [5].

Constitué principalement de clinker portland (K) qui est un matériau hydraulique, le ciment est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20% [6]. Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont [7]:

- Le silicate tricalcique,  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , que l'on écrit  $\text{C}_3\text{S}$ .
- Le silicate bi calcique,  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , que l'on écrit  $\text{C}_2\text{S}$ .
- L'aluminate tricalcique,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , que l'on écrit  $\text{C}_3\text{A}$ .
- L'aluminoferrite tetracalcique,  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , que l'on écrit  $\text{C}_4\text{AF}$ .

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de **BAP**. Cependant, l'utilisation du ciment composé (c'est-à-dire **CEM II/B 42,5** qui contient au moins **95 %** de clinker), nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales [8].

- **Les différents types de ciment :**

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types, ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne. [9]

CEM I: Ciment Portland.

CEM II : Ciment Portland composé.

CEM III : Ciment de haut-fourneau.

CEM IV : Ciment pouzzolanique.

CEM V : Ciment composé.

#### **I.4.2 Les granulats**

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0mm et 40mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. [9]

Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivière, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées. Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivière et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants.

Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport granulats/sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le  $D_{\max}$  augmente. Ainsi, le  $D_{\max}$  des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm. [10]. La plupart des bétons autoplaçant ont un  $D_{\max}=16$ .

#### I.4.3 L'eau :

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes : [9]

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance.
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances.

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

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de super plastifiants. [9]

#### I.4.4 Les ajouts minéraux

Une addition minérale est définie par la norme européenne **EN 197-1** comme étant, un matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières [11].

Il existe deux catégories des ajouts minéraux :

- **Les fines actives** : additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent (cendres volantes, fumée de silice, laitier...etc.).
- **Les fines inertes** : comme les fillers calcaires, l'objectif de leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance.
- **Avantages économiques et environnementaux [12] :**

L'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la

quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO<sub>2</sub> de l'industrie cimentière dans la nature.

▪ **Avantages techniques [12]:**

- améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons, en raison de leurs petites dimensions.
- limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble.
- Les additions minérales réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

#### **I.4.4.1. Différents types d'additions minérales :**

##### **I.4.4.1.1 Fillers de calcaire**

Sont des matières minérales naturelles ou artificielles, qui après une préparation appropriée en fonction de leur granulométrie, améliorent les propriétés physiques (ouvrabilité et pouvoir de rétention d'eau). Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement, hydrauliques latentes. Zhu et Gibbs [13], 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 et ce pour deux super plastifiants différents. En revanche, leur étude sur bétons montre que le type de filler a une forte influence sur la demande en super plastifiant (choisit dans leur étude) pour obtenir un étalement donné. Les fillers à base de craie nécessitent plus d'adjuvant que les fillers calcaires et ceci sont particulièrement remarquables dans le cas où le taux de remplacement est important.

##### **I.4.4.1.2 Fumée de silice**

Il s'agit d'un sous-produit de la fabrication du silicium métal et de ses alliages, en particulier du Ferro-silicium, la fumée de silice obéit à la norme [NF EN 13263-1] Elle se caractérise par un diamètre des particules sphériques ultra fines (entre 0,01 et quelques micromètres) et par une teneur en silice amorphe de plus de 90%. L'emploi de la fumée de silice doit se faire conjointement avec un fluidifiant du type super plastifiant afin de remédier à l'agglomération causée par sa finesse. Une bonne dispersion, permet aux particules de la fumée de silice de se placer entre les interstices des grains de ciment, diminuant ainsi la quantité d'eau nécessaire au mélange. L'utilisation de la fumée de silice conduit à des bétons

extrêmement compacts à caractéristiques mécaniques élevées et une résistance nettement renforcée vis-à-vis des milieux agressifs. [14]

#### I.4.4.1.3 Laitier de hauts fourneaux

Le laitier granulé de haut fourneau est un matériau hydraulique latent, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il subit une activation convenable. Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment [15, 16]. Shi et al. [17] 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 de cisaillement.

#### I.4.5 Les adjuvants :

L'action principale des super plastifiants est de flocculer les grains de ciment (**Fig. I.2**), 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 floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles [12]. Leur mode d'action est similaire à celui des plastifiants, mais il se produit avec une intensité bien plus importante. Par rapport au béton témoin fabriqué identiquement mais sans superplastifiant, à maniabilité égale, il doit permettre une réduction d'eau minimale de 12%, en fait ce pourcentage est généralement réduit de **15 à 25 %** suivant le dosage [18].

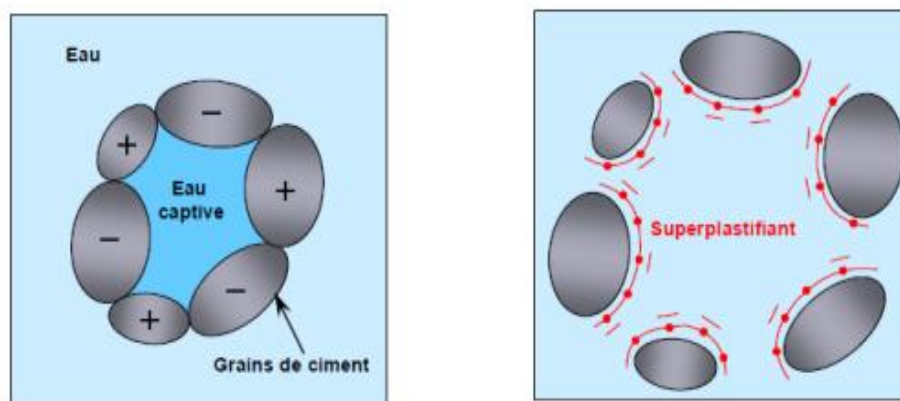


Figure I.2 : L'effet du superplastifiant sur les grains de ciment.

### **I.5. Méthode de formulation pratique des BAP :**

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (Approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) Pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

#### **I.5.1. Approche japonaise**

En général, cette approche consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances et pour satisfaire les critères d'ouvrabilité.

Le volume du gravier est fixé à la hauteur de 50% du volume des solides contenus dans le béton. Selon les auteurs, ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier.

Toutefois, le volume de gravier dans cette méthode est généralement sous-dimensionné pour pouvoir éviter les risques de blocages, ce qui peut conduire à des problèmes de retrait (le volume de la pâte étant important). Le béton obtenu est ainsi loin d'un optimum économique. De ce fait, plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode. En effet, ils ont réussi grâce à l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) à augmenter le dosage de sable dans le mortier et à réduire donc le volume de pâte, et particulièrement du ciment, dans le béton. [1]

En travaillant avec des matériaux locaux, d'autres auteurs [12] ont trouvé qu'il est possible d'augmenter le volume de gravier dans le béton à la hauteur de 60% du volume solide total, et d'obtenir un béton autoplaçant. Le volume total de pâte est réduit de 10% par rapport à celui obtenu avec la méthode générale.

#### **1.5.2 Approche LCPC (laboratoire central de ponts et chaussées):**

L'approche développée en France au LCPC par Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible [12], qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité.

Le modèle permet d'avoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des différents constituants comme par exemple la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre. Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire.

Cette méthode, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche [3], elle a permis de déterminer des formulations pour un béton à haute performance, béton ordinaire, béton sec pour démoulage immédiat, béton autoplaçant).

Des extensions de cette méthode de formulation ont été effectuées par les mêmes auteurs [3] afin de prendre en compte plus de paramètres tels que les propriétés des bétons à l'état durci (retrait, fluage, module d'élasticité, résistance à la traction et à la compression).

### **I.5.3 Approche CBI (suédoise)**

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cément Och Betong Institute) et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette approche est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures et le volume des granulats dans le béton. [19], [20], [21]

Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués par différents auteurs cités par ([22], [23], [24]) sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles.

Passant à travers différents espacements d'armature pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au-dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats) et de la forme des granulats (roulés ou concassés).

Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide.

Les principales modifications et extensions de la méthode CBI sont apportées par [3], qui a proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Ils'agit d'ajouter un

volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats.

## I.6 Caractérisation d'un béton autoplaçant

### I.6.1 Caractérisation des BAP à l'état frais :

#### I.6.1.1 Essais de l'étalement (Essai au cône d'Abrams)

Pour la détermination de l'étalement (SLUMP FLOW) on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (800 mm), puis il est rempli de BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue qui devrait être comprise entre 600 et 750 mm. Ce qui donne un indice sur la viscosité d'un mélange de béton [4].

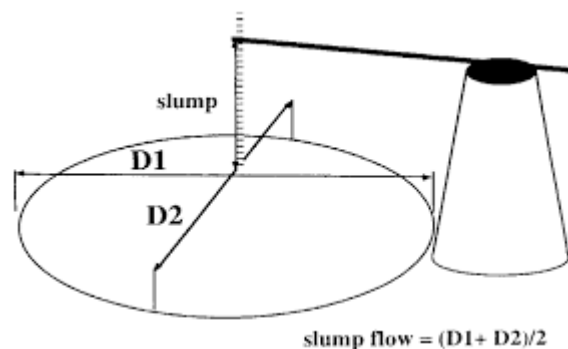


Figure I.3 : Essai d'étalement

#### I.6.1.2 (Essai de la boîte en L)

La boîte en L permet de caractériser la mobilité du béton frais en milieu confiné (ségrégation dynamique) et de vérifier que la mise en place du béton se fait sans blocage, ni formation de voûtes au voisinage des armatures.

Le principe de cet essai (figure I.4), est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte, laisser le béton se reposer 1 min puis enlève la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers le ferrailage. On mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le taux de remplissage H2/H1.

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrillés. Selon le groupe association française de génie civil AFGC [16], le taux de remplissage doit être supérieur à 0,8.



Figure I.4: boîte en L.

### I.6.1.3 Essai de la stabilité au tamis

Une résistance à la ségrégation statique se traduit par la capacité d'un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement des particules par gravité, ni ressuage.

Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de stabilité au tamis (figure I.5). L'essai est développé par la société « GTM construction », il permet de qualifier les BAP vis à vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un sceau, puis couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn, on mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis [3].

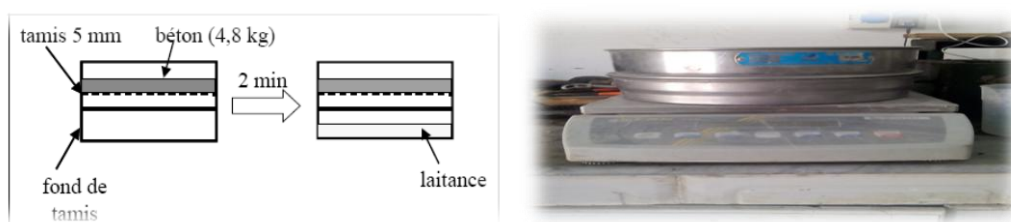


Figure I.5: Essai de la stabilité au tamis.

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

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

#### I.6.1.4 Essai rhéologique (Rhéomètre)

En plus des essais normalisés et recommandés pour les BAP qui permettent d'évaluer l'ouvrabilité et la stabilité des BAP, des mesures des caractéristiques rhéologiques ont été effectuées à l'aide d'un rhéomètre à géométrie Vane.

Le rhéomètre est un appareil conçu spécialement pour mesurer les propriétés rhéologiques des fluides [25, 26]. Ils permettent une caractérisation plus complète en termes de viscosité, de plasticité (seuil d'écoulement) et d'élasticité.



Figure I.6 Appareil rhéomètre

#### I.6.2 Caractérisation des bétons Autoplaçants à l'état durci :

Les caractéristiques essentielles des BAP par rapport à un autre béton formulé à l'état durci c'est la résistance, la déformation et la durabilité....etc.

##### I.6.2.1 Résistance mécanique :

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique et augmente de 50 à 80% de celle de référence à 7j et de 20 à 40% à 28j. Par contre que la résistance à la traction à 28j pour les BAP conservés dans l'eau est supérieure à celle du béton de référence conservé dans les mêmes conditions [12].

##### I.6.2.2 Module d'élasticité (en compression)

Des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires vibrés à résistance mécanique égale sont testés par [12]. Pour des rapports gravier sur sable G/S similaires, le module d'élasticité des BAP est équivalent avec celui des BO. Par ailleurs, pour des rapports G/S différents, le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons autoplaçants.

En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leurs modules respectifs (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats).

## I.7 Propriétés physico-chimiques et durabilité d'un BAP

### I.7.1 Carbonatation :

La vitesse de propagation de la carbonatation est influencée par plusieurs facteurs, certains sont internes (la composition du béton) et d'autres sont externes (liés à l'environnement). On peut citer alors, le rapport E/C, le pourcentage du CO<sub>2</sub>, la température et l'humidité. Les premiers tests d'après [EN 206-1], réalisés sur des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants montrent qu'il n'existe pas une différence importante entre leurs cinétiques de carbonatation [27].

### I.7.2 Absorption capillaire :

Définie par le transfert de liquides dans un matériau poreux grâce à des tensions de surface dans les capillaires. Ce phénomène n'est pas attaché uniquement à la porosité du matériau mais aussi à son humidité. En général, l'absorption d'eau à l'intérieur d'un béton sec dépend de deux grandeurs, la porosité effective du matériau et la vitesse d'absorption. [EN 206-1] affirment que l'absorption capillaire des BO est supérieure à celle des bétons autoplaçants et ces bétons peuvent avoir des propriétés remarquables s'ils contiennent des laitiers ou des fillers calcaires. [28]

## B. l'effet de la fumée de silice sur le béton autoplaçant

### Introduction :

Grace à sa surface spécifique et sa grande finesse, la fumée de silice permet d'obtenir des bétons plus denses avec une porosité très fine, plus imperméables et donc plus durables. A cet effet, et afin d'améliorer les performances de notre béton, on a pensé à introduire de la fumée de silice comme ajout qui représente une couleur gris clair, et joue le rôle de filler. [29]

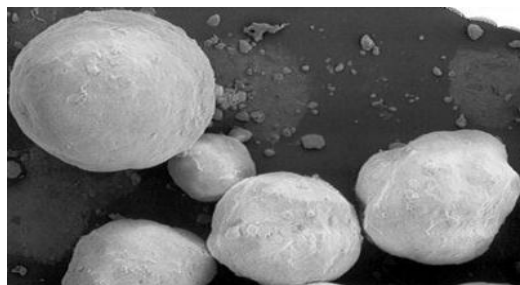


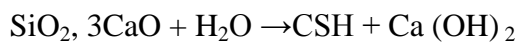
Figure I.7 : Les grains de la fumée de silice par (MEB) [30].

### I.8 Mode d'action de la fumée de silice :

Comme les cendres volantes, les fumées de silice ont une réaction pouzzolanique. Elles réagissent avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment et se transforment en silicate de calcium hydraté (CSH). En raison de leur grande finesse et de leur teneur élevée en  $\text{SiO}_2$ , elles sont beaucoup plus réactives. Cela se manifeste par exemple par le fait que si l'on utilise de la fumée de silice comme ajout ou pour remplacer une partie du ciment, la chaleur d'hydratation d'un béton augmente pendant les trois premiers jours. L'augmentation considérable de la résistance et la durabilité des bétons contenant de la fumée de silice par rapport aux bétons sans ajout s'explique généralement par une plus fine répartition des pores [30].

#### I.8.1. L'effet pouzzolanique :

La fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte. Sa finesse et ses propriétés pouzzolanique confèrent à la fumée de silice une forte réactivité avec les  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  produits durant l'hydratation du ciment :



#### I.8.2. L'effet granulaire:

La fumée de silice est 100 à 150 fois plus fine qu'une particule de ciment et peut remplir les vides interstitiels entre les fines et les grains de ciment. Cet empilement granulaire optimal contribue ainsi à réduire fortement la porosité et la perméabilité du béton (**Figure I.8**) [31].

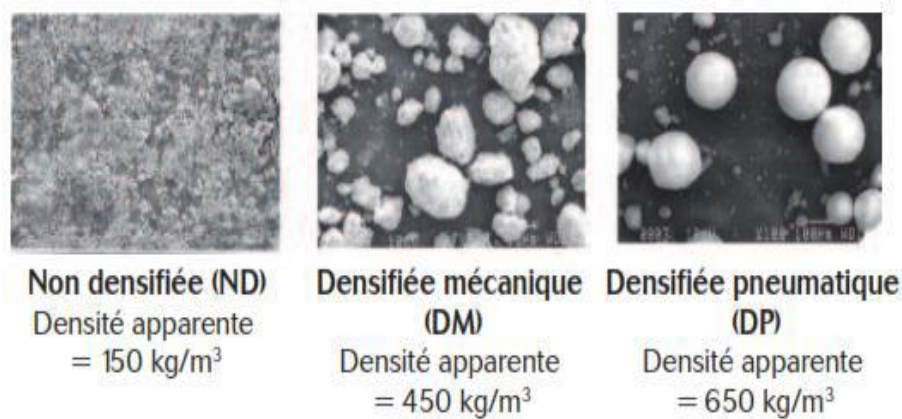
### I.9. Caractéristiques des fumées de silice :

Tableau I.1. Les principales grandeurs caractéristiques de la fumée de silice [31].

Teneur en $\text{SiO}_2$ [%]	Teneur en $\text{CaO}$ [%]	Teneur en $\text{Al}_2\text{O}_3$ [%]	Densité [Kg /dm <sup>3</sup> ]	Surface spécifique [m <sup>2</sup> /g]	Densité apparente [Kg /dm <sup>3</sup> ]	Grandeur moyenne particules [ $\mu\text{m}$ ]	Perte au feu [%]
85 - 95	0,1 – 5	0,2 – 3	2,1 – 2,2	15 – 25 (BET)	0,2 – 0,3	0,1 – 0,2	0,7 - 4

### I.10. Les formes de la fumée de silice :

- **Poudre non-densifiée**, d'une densité apparente d'environ  $200 \text{ Kg/m}^3$ , pratiquement pas manipulable sur les chantiers.
- **Poudre densifiée**, d'une densité apparente d'environ  $500 \text{ Kg/m}^3$ , sa manipulation ne pose pas de problème, mais la durée du malaxage doit être prolongée afin que l'ajout soit réparti uniformément (**Figure I.8**).
- **Suspension aqueuse (coulis)**, avec environ 50% de matières solides de densité apparente à  $1400 \text{ Kg/m}^3$ , sensible au gel doit être remuée pour rester homogène et stable.



**Figure I.8 : Les différentes formes de la fumée de silice [30].**

### I.11. Dosage de la fumée de silice dans le béton :

Les fumées de silice sont généralement ajoutées en quantités variant entre 5 et 15% de la masse de ciment. C'est cependant à partir de 10% de la masse que l'on constate une nette amélioration de l'ouvrabilité. Le dosage de certains entraîneurs d'air doit être plus élevé dans les bétons contenant des fumées de silice que dans les bétons normaux, particulièrement en présence de faibles valeurs ( $E/(C+S)$ ) et de certains super fluidifiants [30].

### I.12. Rôle de la fumée de silice dans le béton frais :

Chaque Kg de fumée de silice fixe environ 1 Kg d'eau de gâchage sous forme de couche mince sur la surface. Les particules de fumées de silice mouillées adhèrent aux particules de ciment, lesquelles sont de ce fait réparties uniformément. Elles remplacent également une partie de l'eau interstitielle. Il en résulte une pâte de ciment durcie de structure plus régulière. On peut ajouter des superplastifiants, un béton frais de cette composition

témoigne d'une bonne pompabilité et même de consistance plastique au ressuage ni à la ségrégation [30].

### **I.13. Rôle de la fumée de silice dans le béton durci :**

Deux des propriétés des bétons contenant des fumées de silice sont particulièrement intéressantes : la faible perméabilité et la résistance élevée. C'est entre le 3<sup>ème</sup> et les 28 jours que les fumées de silice apportent la principale contribution à la résistance. Cette résistance est généralement pareille ou supérieure à celle des bétons sans ajout, indépendamment de l'utilisation des fumées de silice comme substituant du ciment ou comme ajout. Les BAP résistance en particulier sont sensibles à la rupture de fragilité et peuvent de ce fait se rompre soudainement sans déformation notable au préalable. Bien que la porosité globale reste à peu près la même, la perméabilité des bétons contenant du fumée de silice est frottement réduite, car il y a moins de gros pores dans la pâte de ciment durcie. On a par exemple mesuré dans des bétons avec 300 Kg de ciment et 0% et 5% de fumée de silice des coefficients de perméabilité à l'eau respectivement  $3 \times 10^{-11}$  et  $6 \times 10^{-14}$  m /s. La réduction de la perméabilité et la conductivité moindre favorisent la protection contre la corrosion [30].

### **I.14. Avantages de la fumée de la silice :**

#### **I.14.1. Sur la maniabilité et durabilité [31] :**

- moins de ségrégation (nids de cailloux et ressuage).
- transfert par pompage sous pression possible sur de grandes distances.
- projection sur des parois sans perte de produit dans le cas de béton projeté.
- empêche la pénétration d'agents agressifs comme notamment les acides, les sulfates, le dioxyde de carbone et les chlorures marins
- Imiter la porosité des bétons en réduisant la taille des pores.

#### **I.14.2. Sur la Performances mécaniques [31] :**

- Augmente la proportion de granulats grossiers par rapport aux granulats fins.
- améliore l'adhésion des différents constituants d'un béton.
- Un béton contenant de la fumée de silice supporte un plus grand nombre de cycles gel/dégel.

## C. Rhéologie des bétons autoplaçant

### Introduction :

La rhéologie est définie comme étant la science qui traite l'écoulement, les déformations, et plus généralement la viscosité des matériaux sous l'action des contraintes [32] [33]. La rhéologie est capable d'intégrer l'étude de l'ensemble des substances, qu'elles soient liquides ou solides.

L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis son apparition en 1928 [34], avec l'application de nouvelles substances aux comportements complexes : pâtes, suspensions, polymères, etc.

Pour le cas du béton, on s'intéressera à l'étude de son écoulement alors qu'il est encore à l'état frais. Le béton composé de particules de ciment, de granulats, d'eau et d'air, peut être caractérisé comme des particules solides en suspension (agrégat) dans les fluides visqueux (pâte de ciment).

La caractérisation quantitative des propriétés rhéologique est importante pour les raisons suivantes :

- L'ouvrabilité du béton frais constitue un des fondements de la conception du béton.
- Le comportement de l'écoulement du béton frais présente des impacts sur la qualité des propriétés du béton durci.
- Le placement du béton qui comprend le transport, le pompage, le coulage et la vibration, est affecté par la viscosité plastique et la limite d'élasticité du béton frais.

### I.15 Comportements rhéologiques

La rhéologie est utilisé dans plusieurs domaines industriels, notamment les matériaux cimentaires (pâte, mortier et béton de ciment) afin de comprendre et d'identifier leur comportement à l'état frais.

Le comportement rhéologique des matériaux cimentaires est variable et dépend de la composition de la pâte (type de liant, adjuvant, rapport E/L), de la nature et de la teneur des granulats (sable, gros granulats), des différentes interactions entre les particules (hydrodynamiques, frictionnelles ...etc.) et des conditions expérimentales. A travers la

littérature [35,36], on peut classer les fluides selon leurs comportements rhéologiques (Figure. I.9). à savoir que les matériaux cimentaires considérés comme des suspensions de particules de tailles différentes dans un fluide de viscosité variable.

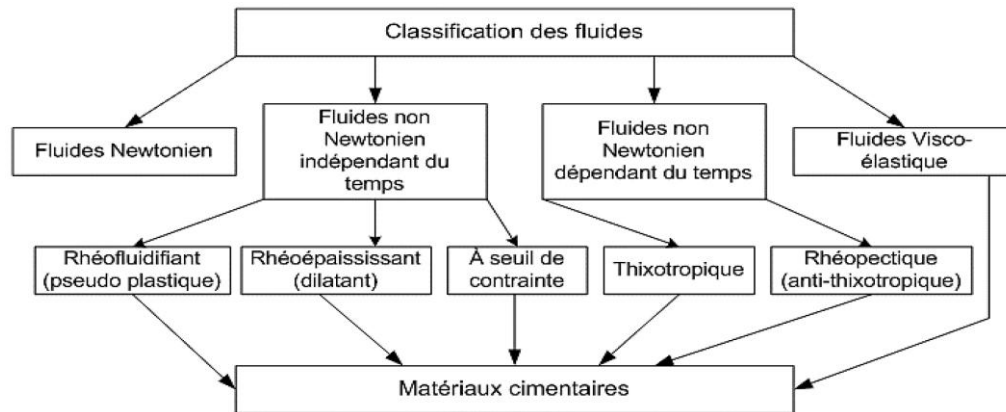


Figure I.9 Classification des fluides selon leur comportement rhéologique [36,37].

## I.16 Quelques définition

### a) Fluide Newtonien :

On appelle liquide Newtonien un fluide dont le rapport entre la contrainte de cisaillement à la vitesse de déformation reste constant. Ce rapport exprime la viscosité, elle est indépendante du cisaillement.

### b) Rhéofluidifiant ou pseudo-plastique:

Un fluide est dit rhéofluidifiant quand la viscosité apparente diminue avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement.

### c) Rhéoépaississant ou dilatant:

Un fluide est dit rhéoépaississant quand la viscosité apparente croît avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement.

**d) Fluide à seuil :**

On appelle un fluide à seuil quand il nécessite une contrainte minimale au-delà de laquelle il peut s'écouler.

**e) Thixotropique :**

Un fluide est dit thixotrope quand sa viscosité diminue avec le temps pour une contrainte de cisaillement donnée. Cela est réversible, le fluide se restructure, c'est-à-dire, que sa viscosité augmente après un temps de repos suffisant.

**f) Rhéopéctique ou anti-thixotropique :**

La rhéopéctie est le contraire de la thixotropie. La viscosité d'un fluide Rhéopéctique augmente avec le temps en appliquant une vitesse de cisaillement constante. Ce phénomène est réversible, au repos il y a une déstructuration du fluide, la viscosité diminue.

**g) Fluides viscoélastiques :**

La viscoélasticité linéaire caractérise un comportement intermédiaire du matériau entre un solide élastique de Hooke (les déformations sont proportionnelles aux contraintes) symbolisé par un ressort de module  $E$  (ou  $G$ ) et un fluide visqueux Newtonien (vitesses de déformations proportionnelles aux contraintes) symbolisé par un amortisseur de viscosité  $\mu$ . L'élasticité d'un matériau traduit sa capacité à conserver et restituer l'énergie après déformation, la viscosité traduit sa capacité à dissiper l'énergie.

**h) Viscosité :**

La viscosité est une grandeur physique qui traduit la résistance à l'écoulement uniforme de la matière. La viscosité peut aussi être définie comme étant le frottement interne d'un fluide dû aux interactions moléculaires.

**i) Seuil de cisaillement :**

Le seuil de cisaillement représente la contrainte minimale appliquée au fluide afin d'initier un écoulement. En dessous de cette contrainte, aucune déformation ne se produit.

### I.17 Rhéomètres :

Les mesures réalisées sur bétons [37], [38], [39] montrent que ces matériaux ne sont pas des fluides newtoniens, mais qu'ils présentent un comportement viscoplastique.

Les propriétés d'écoulement de béton peuvent souvent être décrites approximativement en utilisant un modèle de Bingham, définie par deux facteurs, la viscosité plastique et le seuil d'écoulement.

Les tests empiriques les plus couramment (Essai d'étalement, la boîte en L...) [40,41] sont insatisfaisants car ils mesurent un seul paramètre qui n'est pas suffisant pour caractériser complètement la rhéologie du béton.

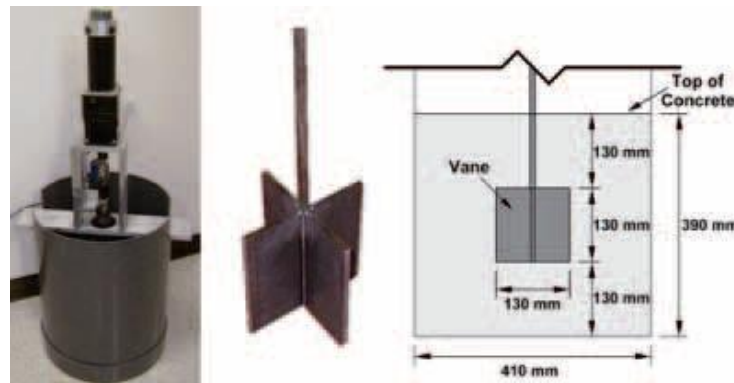


Figure .I.10 Vue générale du rhéomètre [40,41]

Les rhéomètres à béton ont fait ces vingt dernières années de nombreux développements à savoir :

- Two-point test [rhéomètre de Tattersall], rhéomètre rotationnel disponible dans le commerce pour béton.
- IBB est un rhéomètre rotatif. Il est dérivé de Two-point test. Le principe est identique.
- BML est un rhéomètre rotatif [42]. Il dérivé de l'appareil Two-point test. Le principe de fonctionnement est indiqué, mais la forme d'ailette a été modifiée par Wallevik et Gjorv.
- BTRHEOM est un rhéomètre de plaques parallèles [43], pour chaque essai, un échantillon de béton ayant la forme d'un cylindre creux est cisailé entre deux plans horizontaux.

Il existe d'autres géomètres de l'agitateur par le BTRHEOM, c'est le cas de cylindre concentrique et de cône et plaque.

### I.18 Paramètres rhéologiques :

Les valeurs rhéologiques de cisaillement et de viscosité plastique dépendent fortement du type d'appareils et de géométrie utilisée. Les différents appareils ne permettent pas d'identifier une courbe d'écoulement unique et caractéristique pour chaque béton testé [44].

Le tableau I.2 présente des ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents type de matériau [45], [46] :

**Tableau. I.2 ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents type de matériau [46], [47] :**

Contrainte de seuil $t_0(P_a)$	pâte	mortier	BAP	Béton ordinaire
	10 - 50	10 - 100	50 - 150	400 - 1500
Viscosité plastique $\mu$ (pa.s)	$10^{-2}$ - 6	1 - 5	20 - 100	50 - 100

### I.19 Conclusion :

Cette partie présente un aperçu détaillé sur le béton autoplaçant en tant que nouveau matériau. Elle expose d'abord leur définition ainsi que leur développement, ce chapitre fait une synthèse sur la description des constituants entrant dans la fabrication des BAP et les caractéristiques à l'état frais et durci, finalement, il a donné les avantages apportés par les BAP. Et la deuxième partie contient des notions générales sur les fumées de silice et leur influence sur les bétons spécialement le BAP. L'incorporation de fumée de silice conduit à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons.

La troisième partie porte beaucoup plus sur la rhéologie des BAP. Le développement rhéologique des rhéomètres vise essentiellement une caractérisation rhéologique complète permettant une caractérisation d'ouvrabilité sans avoir recours aux tests empiriques. Ces derniers souvent jugés dépendants de la compétence et de l'expérience de l'opérateur, par contre les valeurs du seuil et de viscosité sont beaucoup moins de ces facteurs. Par conséquent, une corrélation entre grandeurs rhéologique et les propriétés à l'état frais (ouvrabilité) est donc jugé très importante pour une meilleure compréhension du comportement vis-à-vis des caractéristiques mécaniques de ces BAP étudiés à l'état durcis.

# **Les essais destructifs et non destructifs**

## **Les essais destructifs et non destructifs**

### **II.1 Introduction :**

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, si pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et en même temps, plus souples d'évaluation de la qualité du béton. Pour cela on recourt aux essais destructif et non destructifs (END) du béton qui a une grande importance scientifique et pratique.

Le béton doit être soumis à différents essais mécaniques de caractérisation :

#### **a) Les essais Destructifs :**

Ceux basé sur la détérioration des matériaux contrôlé pour détermine les performances souhaité et les propriétés aussi.

Dans notre travail, nous avons utilisé les expériences suivantes :

- Les essais de compression ;
- Les essais de traction fendage ;
- Module d'élasticité

#### **b) Les essais Non Destructifs :**

Les Contrôles Non Destructifs sont un ensemble de méthodes qui permettent l'évaluation de l'état d'intégrité d'un matériau, de structures, ou d'ensembles mécaniques, sans les dégrader.

Et on a utilisé :

- Essai au scléromètre
- Essai ultrason

### **II.2. Essais destructifs sur le béton**

#### **II.2.1. Essai de compression**

La caractérisation du comportement en compression est effectuée conformément à la norme [NA EN 1097], sur des éprouvettes cylindriques et cubiques de dimensions (16x 32 cm<sup>2</sup>) et (10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup>) respectivement (Figure II.1), mûries à l'eau. Les résultats de la résistance à la compression  $R_c$  obtenus à 7, 14, 28 jours représentent la moyenne de trois échantillons. La machine utilisée pour l'écrasement uni axial des cylindres et des cubes est une presse hydraulique dont la capacité maximale est de 1500kN en compression.

L'expression des résultats sera donnée par la relation  $R_c = F/S$  (en MPa) où F est la charge maximale et S la surface de compression de l'éprouvette [47].



Figure II.1 Mesure la résistance à la compression.

### II.2.2. Essai de traction par fendage : [NA EN 12390-6]

La norme (EN 12390-6) précise en particulier les dispositions de mise en charge. L'éprouvette est placée horizontalement entre les plateaux de la presse le contact des génératrices supérieure et inférieure avec les plateaux est assuré l'intermédiaire de bandes de mesures en contreplaqué Okoumé. [48]



Figure II.2 Mesure la résistance à la traction par fendage

### II.2.3. Module d'élasticité statique ( $E_i$ ):

Des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires vibrés à résistance mécanique égale sont testés par [49]. Pour des rapports gravier sur sable G/S similaires, le module d'élasticité des BAP est équivalent avec des BO. Par ailleurs, pour des rapports G/S différents, le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons autoplaçants.

En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leurs modules respectifs (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats).

### II.3. Essais non destructifs sur le béton

#### II.3.1 Essais scléromètre [NA EN 12504-2]

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours. Le scléromètre est un appareil simple qui mesure la " dureté au choc " du béton au voisinage de la surface (Indice sclérométrique).

Cet indice, reporté sur abaque, permet de déduire la résistance à la compression du béton testé.



Figure II.3 Appareil scléromètre

On place l'éprouvette entre les plateaux de la presse et on applique la vitesse constante (0.5MPa) jusqu'à la charge de 10KN, puis on fait l'essai sclérométrique horizontal 9 coups. La distance entre les points d'essai doit être au moins de (20mm), pour éviter l'influence du compactage superficiel du béton.



Figure II.4 Mesure sur éprouvette cylindrique.

Pour chaque zone d'essai, on établit la moyenne des lectures au scléromètre après l'élimination des valeurs très faibles et très fortes.

Pour calculer la moyenne on a :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n si}{n}$$

**S** : dureté au choc d'élément.

**Si** : dureté de la zone de l'élément.

**n** : Nombre de zone d'essai sur l'élément

### II.3.2. Essais ultrason [NA EN 12504-4]

La méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation d'ultrasons traversant le béton à l'aide d'un générateur et d'un récepteur, les essais peuvent être effectués sur des éprouvettes en laboratoire ou sur ouvrage.

L'appareil ultrason permet de mesurer le temps de passage des ondes ultrasoniques longitudinales à travers le béton, ce temps indiqué par un affichage digital. [48]



**Figure II.5: Appareil ultrason.**

L'appareil ultrason se compose de l'instrumentation électrique caractérisée par :

- Un affichage digitale ou on peut lire le temps de propagation des ondes mesurées (**μs**).
- Deux sondes : un émetteur et l'autre un récepteur de fréquence.
- Deux câbles pour le branchement des ondes.
- Une éprouvette cylindrique pour l'étalonnage (**42.5μs**).
- Un alimentaire en charge (batterie).

On branche les deux sondes aux bornes de l'appareil à l'aide d'un câble.

On fait l'étalonnage de l'appareil, on enduit les deux faces de l'éprouvette étalonnée de vaseline.

On déduit la vitesse égale à (**d / t**) exprimé le plus souvent en (**Km/s**).

### II.3.3. La méthode combinée :

Dans certains cas en combine les deux méthodes, essais sclérométrique et auscultation sonique, ce qui permet en suite l'établissement de la résistance mécanique de l'élément testé [50].

Ces techniques ont été évoluées au cours des dernières années en particulier dans le cas de l'évaluation construction.

La résistance à la compression du béton est généralement la propriété la plus prisés. Ceci a conduit au développement d'une méthode qui combine l'indice sclérométrique et la vitesse de propagation ultrasonore.

L'objectif de ces tests combinés est d'évaluer la résistance à la compression du béton coulé sur place, la meilleure approche est généralement de développer une relation de corrélation entre la vitesse d'ultrason, l'indice sclérométrique et la résistance à compression d'échantillon normalisée de laboratoire, dans certains cas l'échantillon ne sont pas disponibles. [51]

On a un exemple d'une formule combinée proposée par FERET qui associe le résultat de l'essai à l'ultrason et celui du scléromètre :

$$R_c = \left( \frac{S}{3,64 + 0,0235 * S - 0,56 * V} \right)^2$$

Avec :

S : l'indice sclérométrique.

V : la vitesse de propagation (mm/μs).

### II.4 Conclusion :

Ce chapitre contient une synthèse bibliographique sur les essais destructif et non destructif qui sont appliqués sur le béton à l'état durci. La sécurité des constructions a été depuis toujours l'un des premiers soucis. Le mauvais comportement de nos constructions lors d'une tragédie est souvent expliqué par la mauvaise qualité des bétons utilisés. Pour cette raison, le suivi et le contrôle de la qualité du béton dans les différentes phases de la mise en œuvre demeurent strictement nécessaires.

# **Caractérisation des matériaux utilisés**

## Caractérisation des matériaux utilisés

### III.1 Introduction:

Dans ce chapitre nous avons décrits les différents constituants entrant dans la composition d'un béton autoplaçant tel que : (granulats, ciment, addition minérales, adjuvants et eau). Ainsi que leurs caractéristiques essentielles de chaque composant avec une description détaillée des modes opératoire pour chaque essai. Ces essais sont réalisés au niveau du laboratoire de génie civil à bordj Bou Arreridj.

### III.2 Les matériaux utilisés sont :

- Le sable de dune de la région de Bousaada.
- Le gravier fraction 3\8 ,8\16
- Le ciment CEM II/B 42,5 MPa de la cimenterie Lafarge de Hammam Dhalàa.
- L'ajout: fillers de calcaires (farine de calcaire de fraction 0 ,08)
- L'ajout : le filler (farine de fumé de silice)
- Les adjuvants : superplastifiants MEDAFLOW 30.

### III. 3 Caractéristiques du sable utilisé :

#### III.3.1 Analyse granulométrique : [NA EN 933-5]

Les résultats obtenus sont représentés dans le (Tableau.III.1) suivant : que **M = 2kg**

**Tableau III.1: Analyse granulométrique du sable (sable de Boussaâda)**

Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2,5	4	4	0,4	99,6
1,25	50	54	5,47	94 ,53
0,63	205,5	259,5	26,30	73,70
0,315	432,5	692	70,14	29,86
0,16	237,5	929,5	94,22	5,78
0,008	49	979	97,23	2,77
Fond	0,75	986,5	98,65	1 ,53

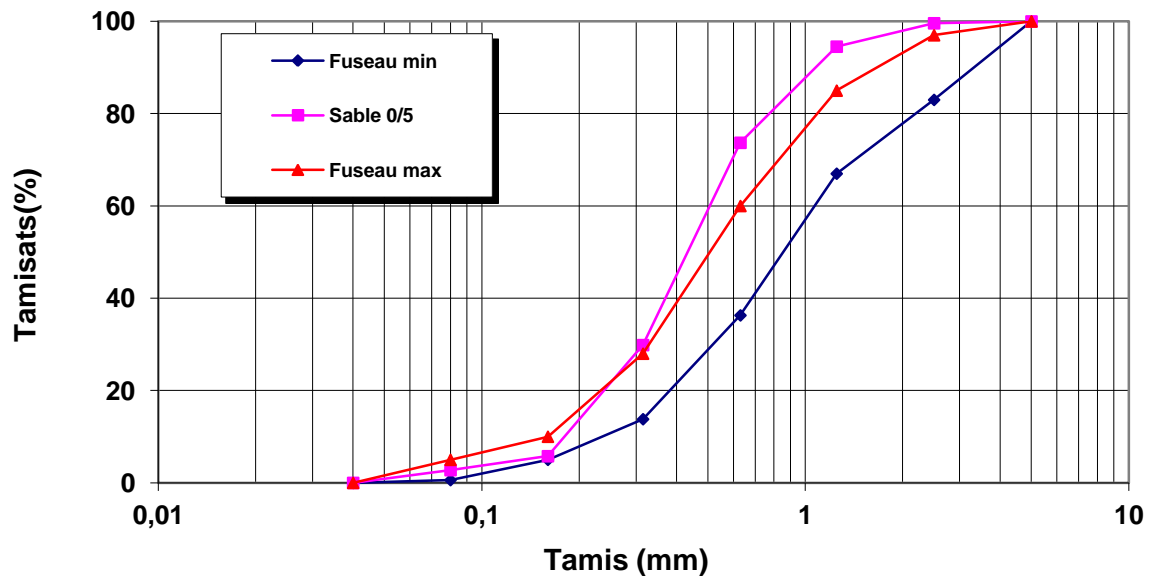


Figure III.1 : Courbe d'analyse granulométrique de sable Bousaada.

✓ **Module de finesse : [NA EN 933-5]**

Calculé par la relation suivante :  $M_f = \sum \frac{R_c}{100}$       Où  $R_c$  : Refus cumulé.

Les normes soviétiques spécifient le  $M_f$  des sables comme suit :

Sable gros  $M_f > 2.5$       Sable fin  $1.5 < M_f < 2$

Sable très fin  $1 < M_f < 1.5$       Sable moyen  $2 < M_f < 2.5$

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant:

$$M_f = \sum R_c / 100 \quad R_c = \text{refus cumulé}$$

$$M_f = 2,05$$

✓ sable utilisé est considéré comme un sable moyen.

### III.3.2 Caractéristiques physiques de sable utilisé (Bousaada) :

#### III.3.2.1 Masse spécifique (absolue) : [NA EN 933-5]

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule:  $\rho_s = \frac{M}{V_1}$

Avec :  $M = 300 \text{ g}$       et      Volume de sable :  $V_1 = V - V_e$        $V_e = 200$

Obtenus Résultats :

**Tableau III.2: Masse volumique absolue du sable.**

Essais	$M_g$	$V_e(ml)$	$V(ml)$	$P \left(\frac{g}{cm^3}\right)$
1	300	200	319	2,52
2	300	200	318,5	
3	300	200	319	

### III.3.2.2 Masse volumique apparent : [NA EN 933-5]

#### III.3.2.2.1 Masse volumique apparente à l'état lâche :

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :  $\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$   
 ( $V_r$ =volume de récipient)  $V_r = 900$

**Tableau III.3: Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche.**

N° d'essai	$M_2(g)$	$M_1(g)$	V (ml)	$\rho_{app}$ (kg/l)	$\rho_{app moy}$ (kg/l)
1	1562	144	900	1,57	1,586
2	1578			1,59	
3	1584			1,6	

#### III.3.2.2.2 Masse volumique apparente à l'état compact :

La masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivant :

$$\rho_c = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

$M_1$ : Masse du récipient à vide.

$M_2$ : Masse du récipient plus le sable.

$V_r$ : Volume du récipient.

Tableau III.4: Masse volumique apparente du sable à l'état compact.

Essais	$M_1$ (g)	$M_2$ (g)	$g_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{moy}$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	144	1683	1,71	1,717
2		1697	1,72	
3		1695	1,723	

### III.3.2.3 Porosité et compacité et indice des vides [NA EN 933-5]

A/ la porosité par la formule :  $P\% = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \cdot 100$

B/ la compacité par la formule :  $C = \left(\frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) = P - 100$

C/ l'indice des vides par la formule :  $e = V_v / V_s = P / (100 - P)$

Les résultats de la porosité, la compacité et l'indice de vide sont regroupés dans les deux tableaux suivants :

Tableau III.5: La porosité, la compacité et l'indice de vide Pour le sable

Porosité (P%)		Compacité (C%)		Indice des vides (e)	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
37,06	31,86	62,94	68,14	0,58	0,46

### III.3.2.4 Equivalent de sable : [NA EN 933-5]

A / Equivalent de sable visuel ( $E_{SV}$ ):

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100 [\%] \quad \text{Où : } h_1 < h_2 \text{ avec : } h_1: \text{ sable propre + éléments fins}$$

B / Equivalent de sable visuel ( $E_{SP}$ ):

$$ESP = \left(\frac{h'_2}{h_1}\right) \cdot 100 [\%] \quad \text{Où } h'_2: \text{ La hauteur du sable } (h'_2 < h_1).$$

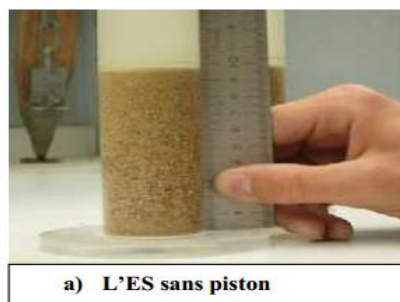


Figure III.2 : Essai équivalent de sable exécuté au laboratoire.

Tableau III.6: Equivalent du sable

$N^{\circ}$ D'essais	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)	$E_{SV}$ (%)	$h'_2$ (cm)	$E_{SP}$ (%)
1	10,6	8,3	78,3	8,2	77,35
2	10,7	8,2	76,63	8,4	78,50
3	10,3	8,3	82,52	8,1	78,64
Moy			79,15		78,16

$(E_{SV})$  Moy = 79,15

et

$(E_{SP})$  Moy = 78,16

Donc :

Tableau III.7: La classification de la nature sable en fonction d' $E_s$ 

<b>E.S.V</b>	<b>E.S.P</b>	<b>Nature et qualité du sable</b>
<b>E.S &lt; 65</b>	<b>E.S &lt; 60</b>	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
<b>65 &lt; E.S &lt; 75</b>	<b>65 &lt; E.S &lt; 70</b>	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
<b>75 &lt; E.S &lt; 85</b>	<b>70 &lt; E.S &lt; 80</b>	Sables propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité
<b>E.S &gt; 85</b>	<b>E.S &gt; 80</b>	Sable très propre : l'absence totale de fine argileuses risque d'entraîne d'un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau

**Pour le sable du dune :** C'est un sable propre à faible pourcentage fines argileux

### III.3.2.5 Teneur en eau : [NA EN 933-5]

La teneur en eau du sable est :  $W = [(M_h - M_s) * 100] / M_s$  [%]

Ou :

- $M_h$ : Poids du sable humide en (g).
- $M_s$ : Poids du sable sec en (g)

**Tableau III.8: Teneur en eau du sable**

Essais	$M_h$ (g)	$M_s$ (g)	W (%)	$M_{moy}$ (%)
1	500	498,5	0,30	0,30
2	500	498	0,40	
3	500	499	0,20	

### III.3.3 Caractéristique chimique du sable :

**Tableau III.9: Les Caractéristiques chimique du sable**

Eléments	Symboles	Teneur en (%)
Silice	$SiO_2$	<b>86.95</b>
Chaux	<b>CaO</b>	<b>6.33</b>
Oxyde de ferrique	$Fe_2O_3$	<b>0.90</b>
Alumine	$Al_2O_3$	<b>1.92</b>
Oxyde de magnésium	<b>Mgo</b>	<b>0.53</b>
Pente de fer	<b>P.A.F</b>	<b>2.81</b>
Sulfate	$SO_3$	<b>0.44</b>

### III.4 Caractéristique du gravier utilisé :

#### III.4.1 Origine du gravier utilisé :

Notre gravier utilisé pour la confection du béton est obtenue par concassage de la roche par Cossider.

Les fractions des graviers utilisés sont :

- Fraction 3/8
- Fraction 8/16

III.4.2. Analyse granulométrique [NA EN 933-5]

Le même essai d'analyse granulométrique de sable

Les résultats indiqués au (Tableau III.10 et III.11) :

Tableau III.10 : Analyse granulométrique du gravier (3/8)

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
10	0	0	0	100
8	7,5	7,5	0,46	99,54
6,3	351,5	359	22,43	77,57
5	450,5	809,5	50,56	49,44
4	505,5	1315	82,18	17,82
3,15	263,5	1578,5	98,65	1,35
2,5	8,5	1587	99,18	0,82
Fond	4	1591	99,43	0,57

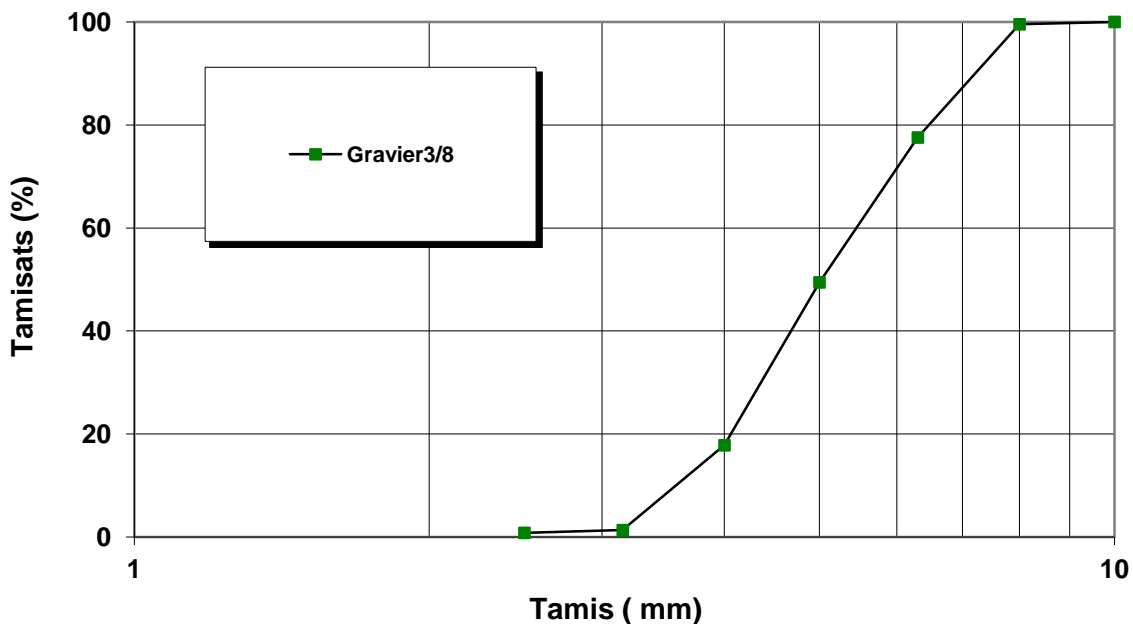


Figure.III.3.Courbe Analyse granulométrique de gravier 3/8.

- Fraction 8/16
- M= 3200 g

Tableau III.11 : Analyse granulométrique du gravier (8/16).

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	0	0	0	100
12,5	696	696	21,75	78,25
10	1120	1816	56,75	43,25
8	818,5	2634,5	82,32	17,68
6,3	481,5	3120	97,5	2,5
5	61,5	3181,4	99,42	0,58
Fond	1	3182,5	99,45	0,54

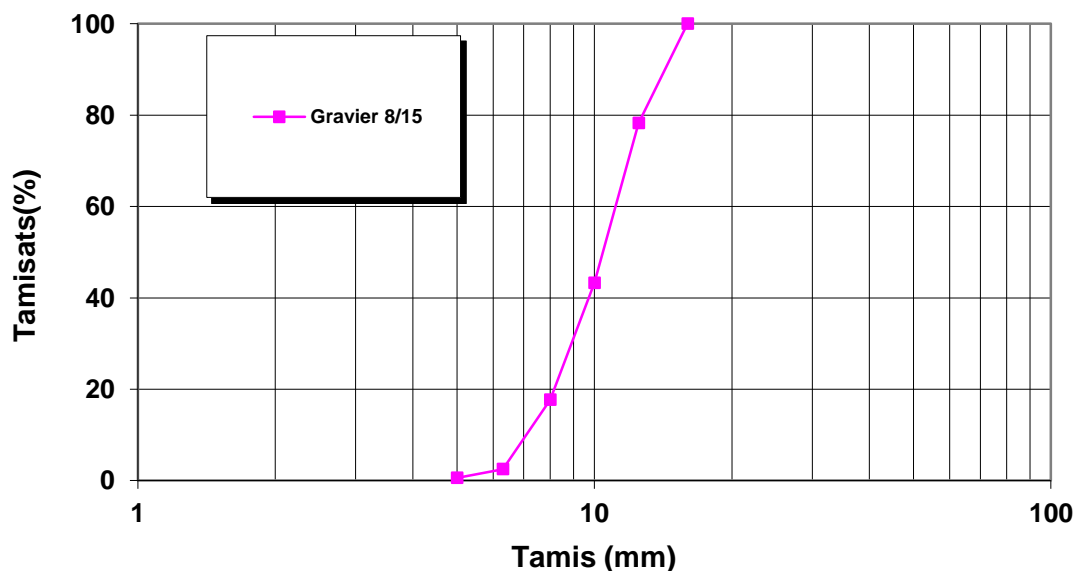


Figure.III.4.Courbe Analyse granulométrique de gravier 8/16.

### III.4.3. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés :

#### III.4.3.1 Masse volumique apparent [NA EN 933-5]

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma = \left( \frac{M_2 - M_1}{V} \right)$$

Où :

- V: Volume du récipient.

- $M_1$ : Le poids du récipient à l'état vide.
- $M_2$ : Le poids du récipient plein de gravier

Tableau III.12: Masse volumique apparente du gravier.

Gravier	N° d'essais	$M_1$ (kg)	$M_2$ (kg)	$\rho_{app}$ (kg/l)	$\rho_{moy}$ (kg/l)
3/8 V=5l	1	3,833	10,942	1,421	1,442
	2	3,833	10,956	1,424	
	3	3,833	10,950	1,423	
8/16 V=10l	1	11,834	25,673	1,383	1,384
	2	11,834	25,697	1,386	
	3	11,834	25,683	1,384	

#### III.4.3.2 Masse volumique absolue :

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique absolue du sable

Tableau III.13: Masse volumique absolue du gravier.

Gravier	Essais	M(g)	$V_e$	V (cm)	P (cm)	$\rho_{moy}$ (g/cm <sup>3</sup> )
3/8	1	200	200	279	2,53	2,55
	2	200	200	278	2,56	
	3	200	200	278	2,56	
8/16	1	200	200	281	2,46	2,49
	2	200	200	279	2,53	
	3	200	200	280	2,50	

#### III.4.3.3 Compacité, porosité et l'indice de vide [NA EN 933-5]

Tableau III.14 : Porosité, compacité et l'indice des vides.

Fraction du Gravier	Porosité P (%)	Compacité C (%)	l'indice des vides (e)
3/8	44,31	55,69	0,79
8/16	44,41	55,56	0,80

## III.4.3.4 Teneur en eau du gravier :

Tableau III.15: Teneur en eau du gravier

Gravier	$M_h$ (g)	$M_s$ (g)	W (%)	$W_{moy}$ (%)
3/8	400	398	0,40	0,59
	400	397,5	0,62	
	400	397	0,75	
8/16	400	397,5	0,62	0,75
	400	396,5	0,88	
	400	397	0,75	

## III.4.4 Caractéristiques mécanique des graviers utilisés :

Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection de bétons.

## II.4.4.1 Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles) : [NA EN 933-5]

la résistance à la fragmentation aux chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles

$$(LA) : LA = (m/M).100$$



Figure III.5: Appareil de l'essai Los Angeles

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

Tableau III.16: Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.

Gravier	Masse initiale M (kg)	Masse m (kg)	Coeff de los Angeles $L_A$ (%)
3/8	5	1,179	23,58
8/16	5	1,264	25,28

Le (Tableau III.17) représentée la classification des roches en fonction du coefficient Los Angeles.

**Tableau III.17 : Classification des roches en fonction du coefficient  $L_A$**

Coefficient $L_A$	Nature de los Angeles $L_A$
<20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
<50	Très tendre

Donc :

**Gravier 3/8** : gravier Dure ( $L_A=23,58\%$ ) (20 à 25)

**Gravier 8/16** : gravier Assez dure ( $L_A= 25,28$ ) (25 à 30)

#### III.4.5 Caractéristiques chimiques des graviers utilisés :

La composition chimique du gravier de carrière COSIDER est établie en mars 2004, à la cimenterie de (M'sila). Elle est donnée au (Tableau III.18). [23]

**Tableau III.18 : Analyse chimique du gravier**

Elément	$S_iO_2$	$AL_2O_3$	$C_aO$	$Fe_2O_3$	$M_gO$	$SO_3$	$K_2O$	$Na_2O$
Teneur (%)	40.65	8.87	40.56	3.25	3.65	0.79	0.65	0.01

#### III.5 CIMENT :

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment portland composé de classe **42.5** provient de la cimenterie de Lafarge de M'sila.

##### III.5.1 Caractéristiques du ciment CEM II/B 42,5 :

##### III.5.1.2 Caractéristiques physiques du ciment utilisé [EN 196-1]:

Le ciment utilisé dans cette recherche est portland composé de classe **42.5** provient de la

Cimenterie Lafarge de M'sila.

Matine (CEM II/B 42.5) ciment gris pour béton de haute performance destiné à la construction des ouvrages d'art (ponts viaducs, tunnels.....)

**Tableau III 19: Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5.**

Les caractéristiques physiques		Unité	Valeur
Masse volumique absolue		$g/cm^3$	3,1
Consistance normale		%	26-28
La finesse (Blaine)		$g/cm^3$	4000-4200
Le Chatelier	A froid	mm	00
	A chaud		2
Temps de prise	Début	min	2 :30
	Fin		3.30
Résistance à la compression	2 jours	MPa	18
	7 jours		32
	28 jours		Plus de 42.5

### III.5.1.3 Caractérisation chimique et minéralogiques du ciment utilisé (CEM II/B 42.5) :

La composition chimique est établie par laboratoire de cimenterie Lafarge de M'sila

**Tableau III.20 Les composition chimique du CEM II/B 42.5 :**

Oxyde	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$CaO$	$Fe_2O_3$	Mgo	$So_3$	$Na_2O$
Teneur %	20.7	4.75	62.92	3.75	1.90	1.98	0.09

Selon la méthode de bogue, la composition minéralogique de ciment CEM II/B 42.5 donnée :

**Tableau III.21 Les composition minéralogique du ciment CEM II/B 42.5 :**

Eléments	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
Teneur (%)	59	14	6	21

## III.6. Le Fillers de calcaire :

L'addition calcaire provient du calcaire de carrière borahli maàza m'sila.

## III.6.1 Caractéristique physique et chimiques du calcaire :

Tableau III.22: La composition chimique et les propriétés physiques du filler calcaire

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Valeurs	Unité
CaO	55,91	Densité absolue	2.45	g/cm <sup>3</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	Densité apparente	0.86	g/cm <sup>3</sup>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	S.S.B	7581	g/cm <sup>2</sup>
SiO <sub>2</sub>	0,40	D <sub>10</sub>	1.1	µm
Mgo	0,18	D <sub>50</sub>	4.06	µm
Na <sub>2</sub> O	0,05	D <sub>90</sub>	28.67	µm
K <sub>2</sub> O	0	I <sub>28</sub>	0.74	/
CL <sup>-</sup>	0,009	I <sub>90</sub>	0.76	/
SO <sub>3</sub>	0,04			
P-A-F (1000°C)	42,68			

## III.7 La fumé de silice :

## III.7.1. Caractéristiques chimiques et physiques de la fumée de silice:

Tableau III.23 Les Caractéristiques chimiques et physiques de la fumée de silice.

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	Massique	Désignation	Valeurs	Unité
SiO <sub>2</sub>	85-95	Masse volumique	2,2	g/cm <sup>3</sup>
CaO	0,8-0,1	Absolue		
Mgo	1-2	Densité	250	Kg/cm <sup>3</sup>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05 – 1	Surface spécifique	1500	Kg/m <sup>2</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 – 3	de Blaine		/
Pert de feu	0,5 - 1	Taille des particules	< 1	µm

**III.8 Les Adjuvants :**

Nous avons utilisé un type des adjuvants super plastifiants qui appelé « **MEDAFLOW 30** » fabriqués par la société Granites à Oued Smar-BP 85-16270 Alger (**Tableau III.24**).

**III.8.1 Description :**

Le « **MEDAFLOW 30** » est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de poly-carboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Et permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité

**Tableau III.24 : Caractéristique de l'adjuvant« MEDAFLOW 30 ».**

Aspect	Couleur	PH à 20°C	Densité	Chlorure	Extrait sec
Liquide	Brun clair	6 – 6.5	1.07 ±0.01	< 0.1 g/l	30%

**III.8.2 Propriétés :****Tableau III.25 : Propriétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci.**

« MEDAFLOW 30 » à l'état frais	« MEDAFLOW 30 » à l'état durci
Obtention un rapport E/C très faible	Augmenter la résistance mécanique à jeune âge et à long terme.
Amélioré la fluidité et la maniabilité	diminuer la porosité
Eviter la ségrégation et facilité la mise en Ouvre	Diminuer le retrait et le risque de fissuration

**III.9.L'eau de gâchage : [EN 1008]**

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université, d'où ces caractéristiques physico-chimiques sont les suivants :

Tableau III.26: Analyse chimique de l'eau utilisée.

Paramètre	Quantité	Commentaire
Ph	8.18	Acceptable pour le gâchage.
Conductivité	1250 $\mu\text{s}/\text{cm}$	
Taux de (Cl <sup>-</sup> )	0.24mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0,15 mg/l	> à la concentration max (0.1)
Taux de (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Turbidité	1,44 NTU	
Dureté total	6,72 °F	15-50
Résidu sec	100 mg/l	

L'analyse chimique de l'eau de gâchage a été réalisée au laboratoire de la chimie université d'Elbachir El Ibrahimy Bordj Bou Arreridj.

### III.10 Conclusion :

Le troisième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux locaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques (Ciment, filler calcaire, fumé de silice, superplastifiant, sable et gravier.) Pour la confection du béton, les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamad EL Bachir Elibrahimi.

# **Techniques Expérimentales**

## Techniques Expérimentales

### IV.1 Introduction :

La partie expérimentale est une continuité de la partie théorique pour compléter le plan de travail et définir les différentes techniques expérimentales. Dans cette partie nous avons indiquée d'une façon principale la formulation utilisée pour le calcul de dosage d'un BAP, ainsi que la mise en œuvre et essais essentiels soit à l'état frais ou durci pour caractérisée ce type de béton qui on a choisir. Ces essais on à effectuée dans un laboratoire équipée au niveau de l'université de Mohamad el Bachir elibrahimi.

### IV.2 Formulation du béton autoplaçant :

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. [14]

#### IV.2.1 Méthode Française :

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC), ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange, il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

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

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante : La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple) le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.

- Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé :
  - les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

- La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104 la teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante, les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle, la teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée, le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes [12].

#### IV.3 Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC :

- **Les données de base :**

On a choisi :

$G/S=0,9$ . Ou  $G/S=1$

-On fixe le rapport  $E/(C+F)=0,5$ .

-Le dosage en super plastifiant est 1.2% de la masse ciment et filler (essai de mini-cone)

**Tableau IV.1 : Dosage de superplastifiant de la masse de ciment et filler.**

Superplastifiant					
Densité ( $G_{sup}$ )	Teneur en solides (s) (%)	$M_{sol} =$ $c*d/100$	$V_{liq} =$ $M_{sol}*100/s*G_{sup}$	$VE = V_{liq}*G_{sup}*100-$ $s/100$	$V_{sol} = V_{liq} -$ $VE$
1,07	30	5,28	16,45	12,32	4,13

- **Optimisation de la composition du BAP**

-Le volume de la pâte pour  $1m^3$  du BAP égale à

-400  $kg/m^3$  du ciment.

-40  $kg/m^3$  Ajout (fumé de silice ou calcaire) (10% du poids du ciment).

- $E/(C+F)=0.4$ .

- $G/S=0.9$

- **Détermination de la masse de chaque constituant :**

On a:

$$-C=400 \text{ kg/m}^3. \quad -F=40 \text{ kg/m}^3$$

$$-E/(C+F)=0,4 \text{ donc } E=0,4*(400+40) \text{ } E= 176.L/m^3$$

▪ **Correction d'eau**

$$E_{cor}=E-E_{SP}$$

$$E_{cor}=176-12.32 \quad E_{cor}=163.68l/m^3$$

▪ **Volume de pate**

$$V_{pate} = \frac{C}{\rho_c} + \frac{F}{\rho_F} + V_{sp} + E + V_{air}$$

$$V_{pate} = \frac{400}{3.28} + \frac{40}{2.26} + 16.45 + 163.68 + 50$$

$$V_{pate} = \frac{400}{3.28} + \frac{40}{2.26} + 16.45 + 163.68 + 50$$

$$V_{pate}=370 \text{ l}$$

$$G+S+V_{pate}=1000$$

$$G+S=1000-V_{pate}$$

$$-G+S=630 \text{ } G=630-S$$

$$-S=299$$

$$-G= 630-299. \quad G= 331 \text{ l/m}^3.$$

**Tableau IV.2 : Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode AFGC :**

Matériaux		Volume L/m³		Teneur kg/m³
<b>Laiant</b>	<b>Ciment</b>			<b>400</b>
	<b>fillers</b>			<b>40</b>
<b>EAU</b>		<b>176</b>		<b>163,68</b>
<b>Sable</b>	<b>S1</b>	<b>298,53</b>	<b>298,53</b>	<b>776,17</b>
<b>Granulats</b>	<b>G1</b>	<b>331,70</b>	<b>165,85</b>	<b>422,91</b>
	<b>G2</b>		<b>165,85</b>	<b>412,96</b>
<b>Superplastifiant</b>		<b>16,45</b>		<b>5,280</b>
<b>Air</b>		<b>50</b>		

#### IV.4 Procédure de fabrication des éprouvettes :

Les éprouvettes ont été fabriquées au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamad el Bachir Elibrahimi et les tests sont effectués au même laboratoire. La préparation du béton auto plaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules cylindrique et cubique nécessaires pour les essais, ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, si non les sécher préalablement dans l'étuve.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée, le super plastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, fumée de silice, filière de calcaire) et les introduire dans le malaxeur.
- La fabrication des gâchées est effectuée dans un malaxeur à axe vertical de capacité **30L** un mode opératoire strict et identique est suivi :
- Brassage à sec du mélange sable + Gravier + ciment +fumé de silice+ filière de Calcaire) pendant **30 s**.
- Ajout de l'eau + super plastifiant **210 s**.
- Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration pour le béton auto plaçant.



Figure IV.1 : Malaxeur à béton laboratoire de GC.

### IV.5 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais :

Les essais proposés par L'AFGC qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisés. Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP.

#### IV.5.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams [NFEN12 350-8]

L'essai d'étalement ou slump flow est utilisé pour caractériser la fluidité du béton [27], le matériel et le mode opératoire sont détaillés dans la norme [NF EN 12 350-8] (**Figure IV.2**)

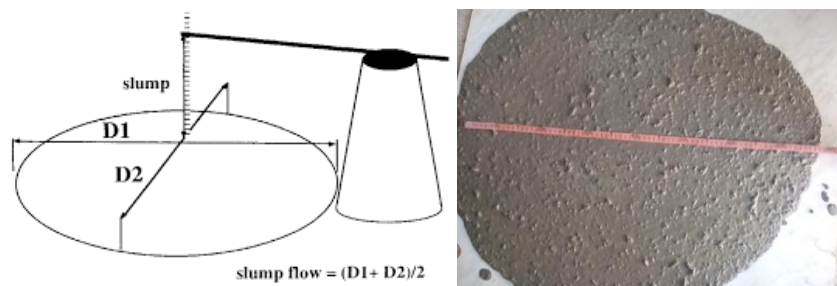


Figure IV.2 : Essai au cône d'Abrams

#### IV.5.2 Essai de la boîte en « L »: [NF EN 12 350-10]

La boîte en L permet de tester la mobilité de béton en milieu confiné (**figure IV.3**) et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables [27].



Figure IV.3 : Essai de boîte en L.

#### IV.5.3 Essai de stabilité au tamis: [NF EN 12 350-11]

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. [15]



Figure IV.4 : Essai au tamis.

#### IV.5.4 Essai Rhéomètre [N 206/CN]

Le rhéomètre est un appareil conçu spécialement pour mesurer les propriétés rhéologiques des fluides [19, 20]. Ils permettent une caractérisation plus complète en termes de viscosité, de plasticité (seuil d'écoulement) et d'élasticité.



Figure IV.5 Essais rhéomètre

#### IV.6 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci :

##### IV.6.1 Essai compression [EN 206-1] :

La résistance est déterminée à 28 jours (**Figure IV.4**), par la formule :  $R_c = \frac{F}{S}$

**S** : section de l'éprouvette : **100 cm<sup>2</sup>**.

**F** : force au moment de la rupture



Figure IV.6: Essai compression

#### IV.6.2 Essai de traction par fendage : [NA EN 12390-6]

La norme [EN 12390-6] précise en particulier les dispositions de mise en charge. L'éprouvette est placée horizontalement entre les plateaux de la presse le contact des génératrices supérieure et inférieure avec les plateaux est assuré l'intermédiaire de bandes de mesures en contreplaqué Okoumé.



Figure IV.7 : Essai de traction par fendage

#### IV.6.3 Module d'élasticité statique ( $E_i$ ):

Le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leurs modules respectifs (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats).

#### IV.6.4 Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NA EN 12504-2]

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours. Le scléromètre est un appareil simple qui mesure la " dureté au choc " du béton au voisinage de la surface (Indice sclérométrique).

Cet indice, reporté sur abaque, permet de déduire la résistance à la compression du béton testé



Figure IV.8 : Principe de l'essai scléromètre.

Pour chaque zone d'essai, on établit la moyenne des lectures au scléromètre après l'élimination des valeurs très faibles ou très fortes.

Pour calculer la moyenne on a :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n si}{n}$$

**S** : dureté au choc d'élément.

**Si** : dureté de la zone de l'élément.

**n** : Nombre de zone d'essai sur l'élément

#### IV.6.5 Ultrason [NA EN 12504-4]

Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton (**Figure IV.8**).



**Figure IV.9: Appareil ultrason**

### V.7. Essai pour la durabilité :

#### IV.7.1 Mesure le taux d'absorption d'eau [NA EN 1097]

La présente norme a pour objet d'exposer la technique de la mesure du coefficient d'absorption d'eau des agrégats. [50]

L'absorption d'eau à la pression atmosphérique est  $M_2 - M_1$ .

Alors le taux d'absorption sera calculer a partir cette formule :

$$A_{bs} = (M_2 - M_1) / M_1$$

**A<sub>bs</sub>** : taux d'absorption.

$M_1$  : masse d'éprouvette après l'étuvage. Et  $M_2$  : masse d'éprouvette saturée d'eau

#### **IV.8. Confection des éprouvettes :**

##### **IV.8.1 Type et tailles des moules :**

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules en acier de forme :

Cubique (10x10x10 cm)

Cylindrique (16x32cm)

Cylindrique (10x20cm)

##### **IV.8.2 Conservation des éprouvettes :**

Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 24h après le coulage puis conservées sous l'eau à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  (figure IV.10).



**Figure IV.10: Conservation des éprouvettes**

#### **IV.9 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons détaillé tous les essais soit à l'état durci ou frais, une description sur le protocole de conception de ce type de béton ainsi que les formules de calcul et les critères fondamentaux de chaque essai.

# **Résultats et Analyses**

## Chapitre V : Résultats et Analyses

### V.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des essais rhéologiques, physiques et mécaniques réalisés sur un béton auto plaçant additionné par deux types d'ajouts (Fumée de silice et calcaire) selon des différents pourcentages (2,5%, 7,5%, 5% et 10%) ceci, pour voir l'influence de la nature et le pourcentage des additions sur les propriétés du BAP à l'état frais et à l'état durci.

### V.2 Les formulations des bétons réalisés sont les suivantes :

**BAP<sub>T</sub>** → Béton auto plaçant avec l'ajout de 10% filler de calcaire

**BAP<sub>I</sub>** → Béton auto plaçant avec l'ajout de 10% de fumé de silice.

**BAP<sub>II</sub>** → Béton auto plaçant avec l'ajout de 5% fumé de silice 5% filler de calcaire.

**BAP<sub>III</sub>** → Béton auto plaçant avec l'ajout de 7,5% fumé de silice 2,5% filler de calcaire.

**BAP<sub>IV</sub>** → Béton auto plaçant mélange 2,5% fumé de silice 7,5% filler de calcaire.

### V.3 Présentation de résultats :

Dans cette partie, nous allons discuter les résultats obtenus d'après les essais exécutés afin de caractériser les BAP confectionnés, en deux états essentiels : « frais et durci » à partir des mélanges obtenus suivant les tests recommandés et déclarés par l'AFGC [24].

#### V.3.1 Résultats des essais à l'état frais :

Les résultats à l'état frais, qui on à obtenir juste après le gâchage pour caractérisée ce type de béton. Qui permet d'étude les propriétés du BAP à l'état frais par :

- **Essai de cône d'Abrams** (essai d'étalement).
- **Essai boîte en L** (contrôlée l'écoulement).
- **Essai de stabilité au tamis** (pour étudier la ségrégation).
- **Essai rhéomètre** (seuil de cisaillement et de viscosité)

Le tableau V.1 présente les résultats des essais rhéologiques des **BAP** avec les ajouts, la fumée de silice et les fillers de calcaire.

Tableau V.1 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec fumé de silice et fillers de calcaire.

TYPED U BETON	Ajout (%)	L'étalement (cm)	Stabilité de tamis (%)	Boite en L (h2/h1)
BAP <sub>T</sub>	10 F <sub>C</sub>	72,5	7,28	1
BAP <sub>I</sub>	10F <sub>s</sub>	57	8,06	0,8
BAP <sub>II</sub>	5F <sub>s</sub> .5F <sub>c</sub>	71	7,18	1
BAP <sub>III</sub>	7,5F <sub>s</sub> 2,5F <sub>c</sub>	74	9,66	1
BAP <sub>IV</sub>	2,5F <sub>s</sub> .7,5F <sub>c</sub>	73	1,78	1

**Commentaire :**

D'après les résultats obtenus dans le tableau précédant, on note que les étalements des bétons autoplaçant testés sont supérieurs à **60 cm**, le taux de remplissage de la boite en L est de l'ordre minimum **80%**, la plus part des **BAP** réalisés donne une valeur de laitance qui est inférieure à **15 %** selon le critère d'acceptabilité donc, on peut déduire que la stabilité au tamis est considéré comme satisfaisante.

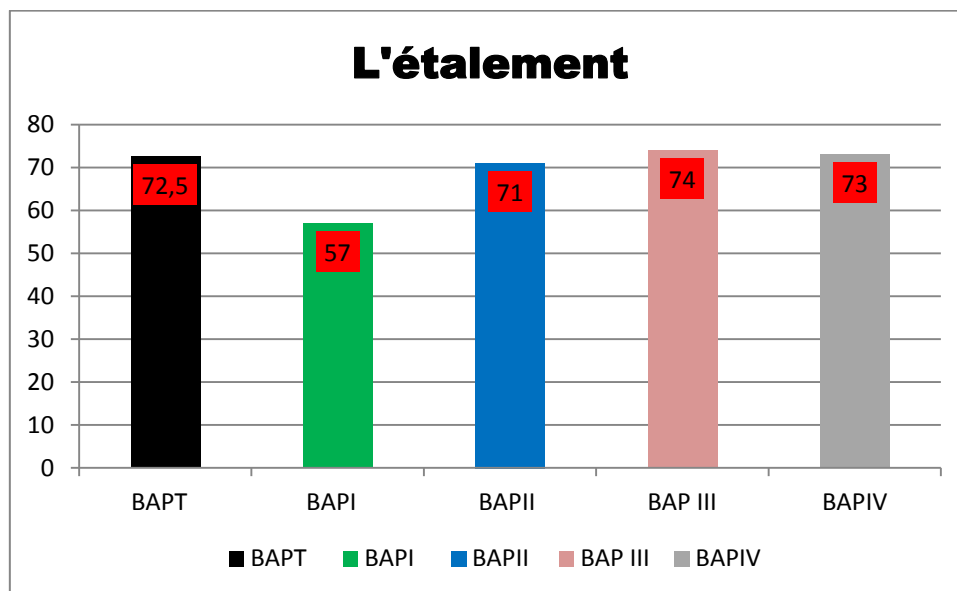


Figure V.1 : L'étalement en fonction du type de béton.

**Commentaire :**

On constate que, le mélange avec **10 %** fumée de silice donne la plus faible valeur d'étalement (**57 cm**) mais qui reste voisine des critères d'acceptabilité (**60-75cm**). Les

facteurs qui influencent sur le mélange (la nature de grains des fillers, adjuvant superplastifiant,); dans se cas de l'ajout fumée de silice seul le type de grains (forme aiguillés) a provoqué une perte de fluidité surtout à un dosage élevé de **10 %**. Des études antérieures sont en corrélation avec les résultats de la présente recherche [51], [52].

D'après les résultats dans le tableau V.1 et la figure V.I, on remarque que tous les **BAP** avec une utilisation combinée d'ajouts (**FS** et **FC**) s'avère avantageuse et donne des valeurs d'étalement dans la marge de (71 – 74) cm justifié par les normes en vigueurs. Ces valeurs sont comparables avec celui du **BAP<sub>T</sub>** de référence. D'après une étude antécédente les mêmes constatations ont été faites [53].

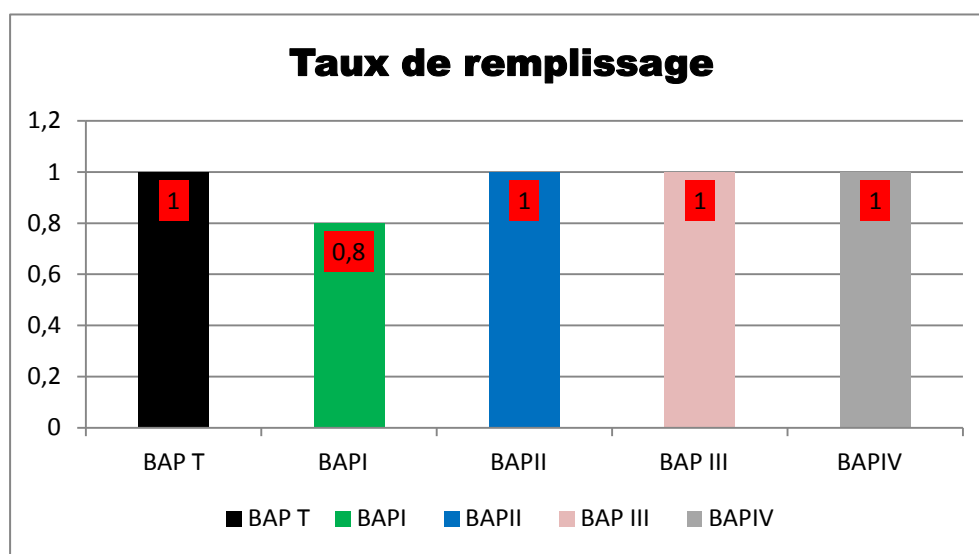


Figure V.2: Le taux de remplissage en fonction du type de béton (Boite en L)

#### Commentaire :

Les résultats obtenus par l'essai de la boite en L sont présentés sur la figure V.2, ce type d'essai permet de vérifier la capacité d'un béton à s'écouler dans un milieu confiné. Enregistrent des indices de ségrégation à (100%) pour tous les **BAP** sauf le dosage de **BAP<sub>I</sub>** de **10 %** du fumé de silice (**80%**), estimé acceptables par ce test selon les normes en vigueur pour les bétons autoplaçants. Ceci peut être expliqué par l'effet suivant :

Dès que le ciment se met en contact avec l'eau, les réactions d'hydratations seront plus poussées et plus accélérées et la germination est facilité par la présence de la silice qui existe dans la poudre de la fumée de silice, sans oublier l'absorption élevée de fumée de silice par rapport à filler calcaire et sans omettre que l'augmentation de l'absorption est en fonction de la finesse, ce qui traduit la variation de la fluidité et l'aisance d'écoulement [54].

On remarque aussi, que l'accroissement de la teneur en addition minérale toujours pour la fumée de silice par rapport au calcaire diminue la résistance à la ségrégation. Ce résultat s'explique par le fait que les grains de l'addition minérale de grande finesse tel que la (FS) améliorent la granulométrie et la compacité des BAP, ce qui peut donner une stabilité accrue.

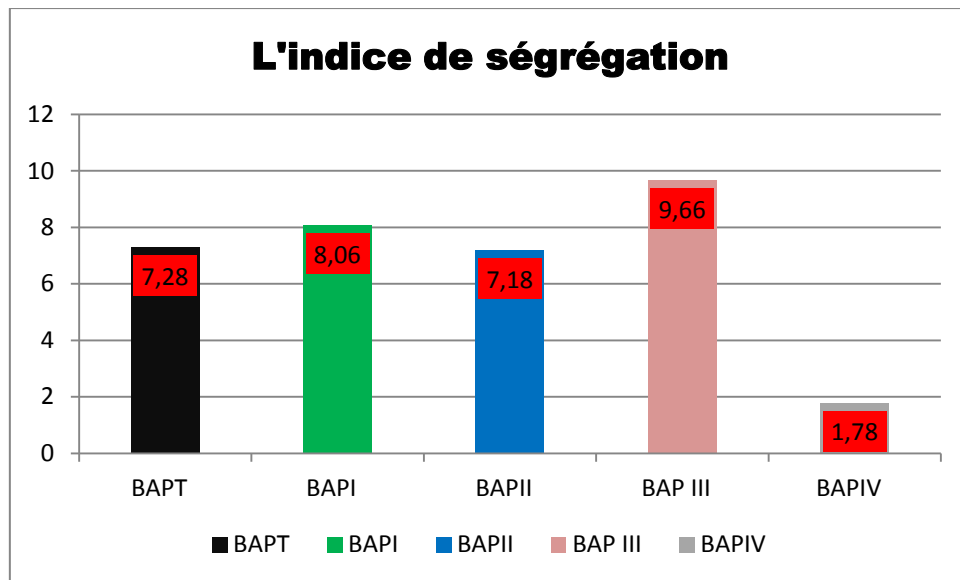


Figure V.3:L'indice de ségrégation dynamique en fonction du type de BAP.

#### Commentaire :

En se basant sur le tableau V.1 et la figure V.3 et en conformité avec la norme AFGC [14]; si la laitance <15 %, on peut dire que le **BAP<sub>T</sub>** avec **7,28%** avec et **BAP<sub>I</sub>** avec **8.06 %** et **BAP<sub>II</sub>** avec **7.18%** et **BAP<sub>IV</sub>** avec **1,78%** ont des bons résultats de faible valeur de l'indice de ségrégation. Lorsque **BAP<sub>III</sub>** enregistre une valeur plus élevée qui atteint un maximum de **9.66 %**. On peut justifier ce résultat par influence des grains fins et le rôle de superplastifiant qui diminue la quantité d'eau dans les bétons.

#### V.3.1.1 Valeurs du seuil de cisaillement et de viscosité à bas de fumé de silice et filler de calcaire :

##### a) BAP+10% filler de calcaire :

Tableau V.2 écoulement des point de BAP+10% FC

vitesse (rev/s)	0,5	0,425	0,350	0,275	0,200	0,125	0,05
couple (Nm)	4,654	3,904	3,186	2,529	1,883	1,265	0,559

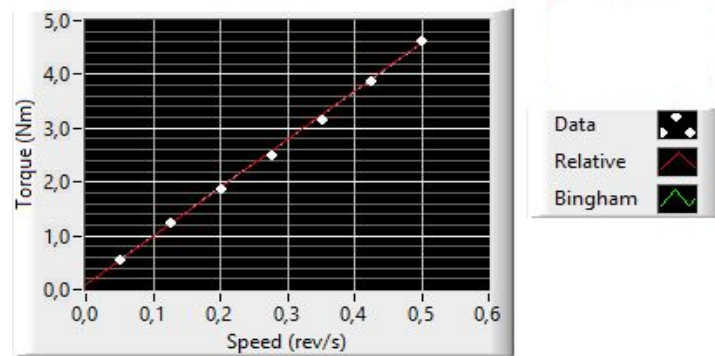


Figure. V4. Courbe d'écoulement des points de BAP+10% FC

b) BAP+10% fumé de silice :

Tableau V.3 écoulement des point de BAP+10% FS

vitesse (rev/s)	0,5	0,425	0,350	0,275	0,200	0,125	0,05
couple (Nm)	6,231	5,236	4,592	3,781	3,139	2,251	1,193

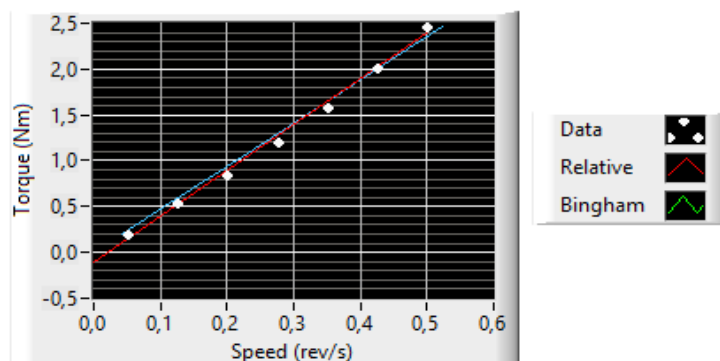


Figure. V.5 Courbe d'écoulement des points de BAP+10% FS

c) BAP+5%FS et 5% FC :

Tableau V.4 écoulement des point de BAP+5% FS et 5%FC

vitesse (rev/s)	0,5	0,425	0,350	0,275	0,200	0,125	0,05
couple (Nm)	4,334	3,451	2,657	2,017	1,441	0,850	0,273

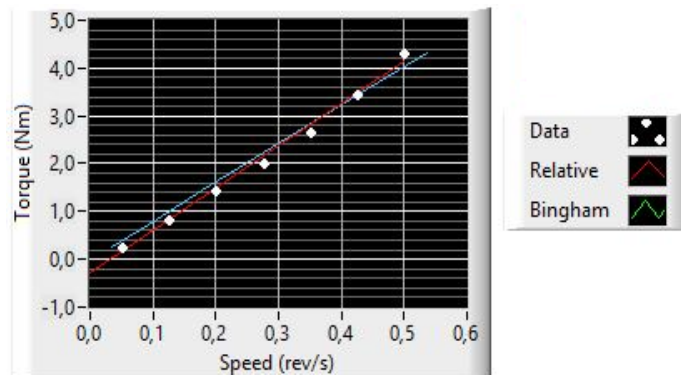


Figure. V.6 Courbe d'écoulement des points de BAP+5% FS et 5%FC

d) BAP+2,5%FS et 7,5% FC

Tableau V.5 écoulement des point de BAP+2,5%FS et 7,5% FC

vitesse (rev/s)	0.5	0.425	0.350	0.275	0.200	0.125	0.05
couple (Nm)	4.650	3.810	3.100	2.240	1.610	1.100	0.398

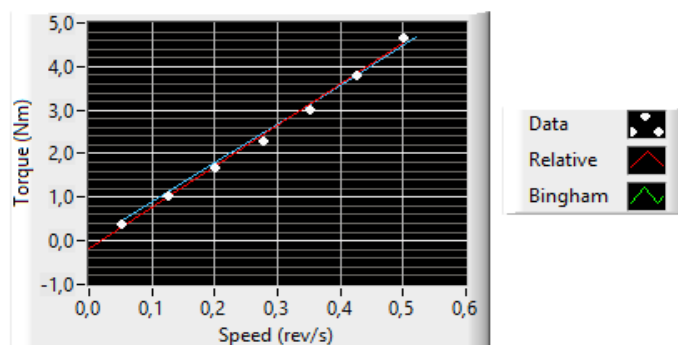


Figure. V.7 Courbe d'écoulement des points de BAP+2,5%FS et 7,5% FC

e) BAP+2,5%FC et 7,5% FS

Tableau V.6 écoulement des point de BAP+2,5%FC et 7,5% FS

vitesse (rev/s)	0.5	0.425	0.350	0.275	0.200	0.125	0.05
couple (Nm)	6.110	5.560	4.150	3.620	2.150	1.889	0.210

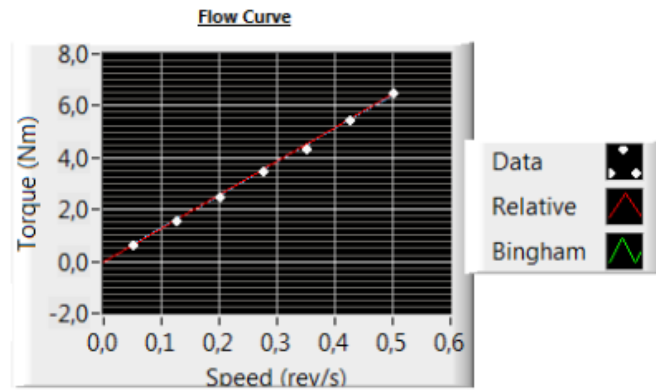


Figure. V.8 Courbe d'écoulement des points de BAP+2,5%FC et 7,5% FS

Tableau V.7 Caractéristiques rhéologique des différents BAP avec FC et FS mesurées par rhéomètre.

Type de béton	Ajout (%)	Caractéristiques	
		Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité plastique (pa.s)
BAP <sub>T</sub>	10% FC	14,9	178,6
BAP <sub>I</sub>	10%FS	140,06	209,01
BAP <sub>II</sub>	5%FS et 5% FC	0,091	160,6
BAP <sub>III</sub>	2,5%FS et 7,5% FC	0,091	177,81
BAP <sub>IV</sub>	2,5%FC et 7,5% FS	0,091	254,99

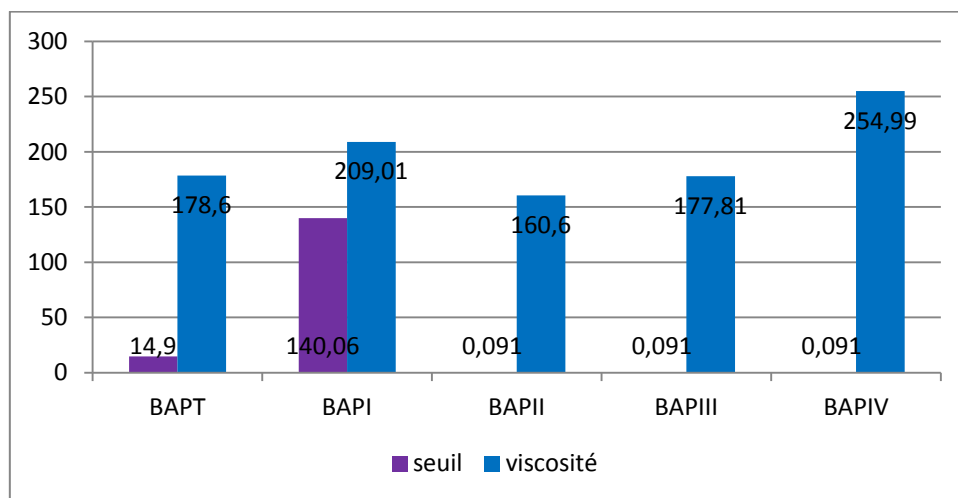


Figure. V.9 Valeur de seuil de cisaillement et de la viscosité des BAP.

**Commentaire :**

Les tableaux et les figure ci-dessus présentent le comportement rhéologique d'un BAP modifié pour la formulation du béton auto plaçant.

La valeur de seuil de cisaillement de  $BAP_I$  de (10%FS) beaucoup plus élevé (140,06 Pa) par rapport  $BAP_T$  de (10% FC) enregistre une valeur de (14,9 Pa), et les autres mélanges des BAP ( $BAP_{II}$ ,  $BAP_{III}$  et  $BAP_{IV}$ ) qu' à donne de petites valeurs (0,091Pa).

On trouve une augmentation de viscosité de l'ordre 42,77% dans la formulation contenant  $BAP_{IV}$  (2,5%FC et 7,5% FS) enregistre une valeur de viscosité  $V(254,99Pa.s)$ , et le  $BAP_I$  de (10%FS) une augmente d'environ 17,02%, et nous remarquons également diminution d'environ 0,44% pour  $BAP_{III}$  de (2,5%FS et 7,5% FC) et 6,71% pour  $BAP_{II}$  de (5%FS et 5% FC), tous les résultats comparé par  $BAP_T$  de (10% FC ), et valeur de viscosité (178,6Pa.s).

Les valeurs de cet essai respectent les normes [N 206/CN] et les recommandations d'AFGC.

On peut conclure que : La nature et la finesse de l'ajout ont un effet sur le seuil de cisaillement et la viscosité du béton auto plaçant.

Le BAP doit avoir un seuil d'écoulement faible pour que l'écoulement s'amorce rapidement et leur viscosité doit être modérée pour limiter le temps d'écoulement.

Ces propriétés sont liées au rôle des du superplastifiant permettent aux grains de ciment d'acquérir des charges identiques et créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Bonneau, (1997) explique ce phénomène par la fixation des polymères à la surface des particules solides du ciment par adsorption. Cette adsorption s'effectue sur les phases hydratées du ciment ceci permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment flocculés et diminue ainsi les frictions inter granulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton ainsi le seuil de cisaillement et la viscosité d'un mélange cimentaire diminuent avec l'ajout d'un superplastifiant [55].

## V.3.2 Caractérisation des bétons a l'état durci :

## V.3.2.1 Résistance à la traction par fendage :

Tableau V.8: La résistance à la traction par fendage des BAP étudiés ( $F_t$ ).

Type de béton	Résistance à la traction par fendage à 28 (jours)				
	BAP <sub>T</sub>	BAP <sub>I</sub>	BAP <sub>II</sub>	BAP <sub>III</sub>	BAP <sub>IV</sub>
$F_t$	4,42	4,53	4,40	4,36	4,70

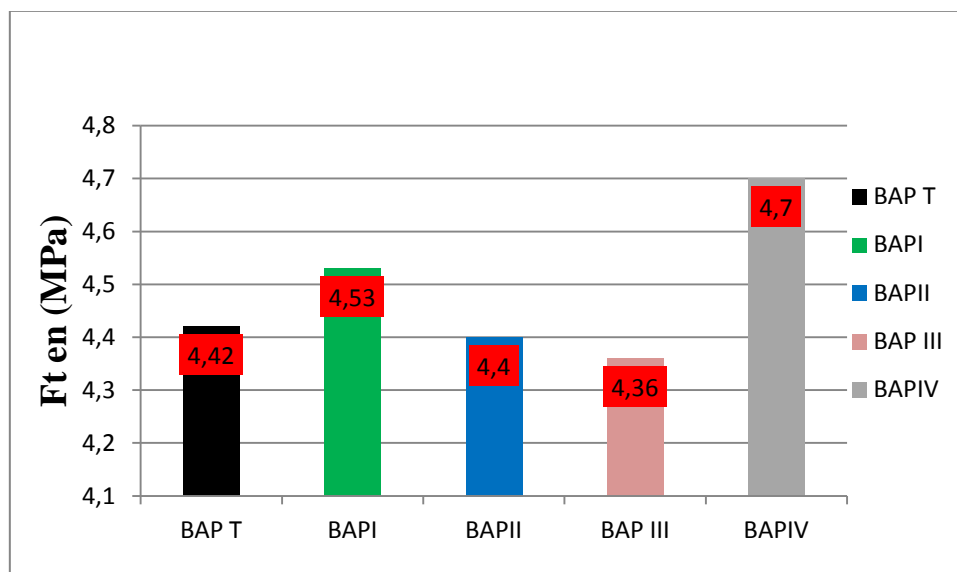


Figure V.10 : la Résistance à la traction par fendage étudiés à 28 jours

## Commentaire :

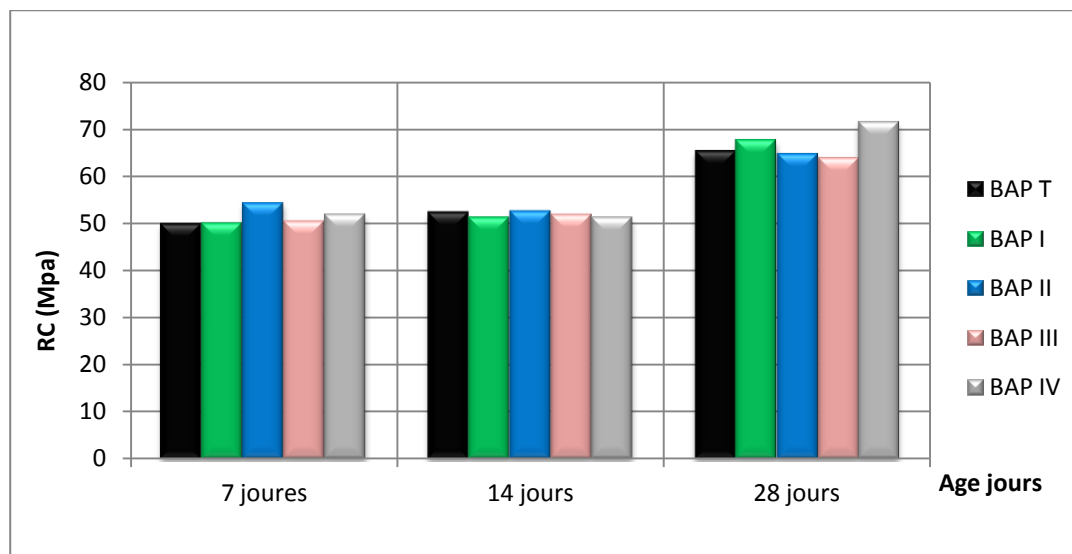
D'après les résultats inscrits dans le tableau V.8 et la figure V.10, on trouve une augmentation de résistance à la traction par fendage de l'ordre de **6,3%** dans la formulation contenant **BAP<sub>IV</sub>** (**2,5%FC et 7,5% FS**) donne une résistance  **$F_t(4,70\text{MPa})$**  et une augmenter d'environ **2,48%** pour **BAP<sub>I</sub>** de(**10%FS**) donne une résistance  **$F_t(4,53\text{MPa})$** , et nous remarquons également une diminution d'environ **0,45%** pour **BAP<sub>II</sub>** de (**5%FS et 5% FC10**) , donne une résistance  **$F_t (4,40\text{Mpa})$** , et une diminution d'environ **1,36%** pour **BAP<sub>III</sub>** de (**2,5%FS et 7,5% FC** ) et de  **$F_t(4,36\text{MPa})$** , par rapport un **BAP<sub>T</sub>** de (**10%FC**)et de  **$F_t(4,42\text{Mpa})$** .Donc on peut déduire que l'introduction de la fumée de silice joue un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des **BAP**. La fumée de silice, donne une bonne résistance pour les pates cimentaires ; ceci est attribué à l'activité pouzzolanique qui consiste à la portlandite  **$\text{Ca}(\text{OH})_2$**  libérée par l'hydratation du ciment pour donner

naissance à des silicates de calcium hydratés **CSH** supplémentaires de deuxième génération occupant un espace important de la matrice cimentaire grâce à la taille nanométrique des particules de la fumée de silice et contribuant ainsi au développement de la résistance [56].

### V.3.2.2 Résistance à la compression :

**Tableau V.9 : La résistance à la compression des BAP étudiés à 7, 14 et 28 jours.**

Type de béton	Résistance à la compression des BAP étudié à 7,14 et 28 jours (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BAP <sub>T</sub>	49,91	52,34	65,26
(BAP <sub>I</sub> )	50	51,26	67,60
BAP <sub>II</sub>	54,36	52,66	64,81
BAP <sub>III</sub>	50,58	52	63,95
BAP <sub>IV</sub>	51,89	51,32	71,48



**Figure V.11 : Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton.**

#### Commentaire :

Selon le Tableau v.9 et la figure v.11, on remarque que le béton **BAP IV (2.5%FC et 7.5% FS)**, enregistre une résistance mécanique  $R_c$  maximale à 28 jours (**71,48MPa**) par rapport aux autres types des bétons, et enregistre une amélioration de l'ordre de **10 %** comparé au témoin. Ces fillers sont composées principalement de **SiO<sub>2</sub>** pour la fumée de silice (FS) et

$\text{CaCO}_3$ , le calcaire (FC). Ces éléments accélèrent l'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$ , ce qui améliore les résistances aux jeunes âges. Cette amélioration est expliquée par la grande finesse des types d'additions, qui améliore la distribution granulométrique.

Le **BAP<sub>I</sub> (10%FS)**, donne une résistance mécanique  $R_c$  (**67 MPa**) plus convergente à celui de **BAP<sub>IV</sub>**, cette résistance est supérieure à celui de **BAP<sub>T</sub> (10% FC)**, le **BAP<sub>II</sub> (5%FS et 5%FC)** donne une résistance mécanique de (**64,81 MPa**), et le **BAP<sub>III</sub> (2,5%FS et 7,5% FC)** de valeur minimale de (**63,95MPa**).

#### V.4 Module d'élasticité statique :

Tableau V.10 : Résultats du module d'élasticité des BAP étudiés.

Type de béton	Module d'élasticité statique ( $E_i$ ) à 28 jours				
	BAP <sub>T</sub>	BAP <sub>I</sub>	BAP <sub>II</sub>	BAP <sub>III</sub>	BAP <sub>IV</sub>
$E_i$ (MPa)	$4,42 \cdot 10^4$	$4,48 \cdot 10^4$	$4,41 \cdot 10^4$	$4,39 \cdot 10^4$	$4,56 \cdot 10^4$

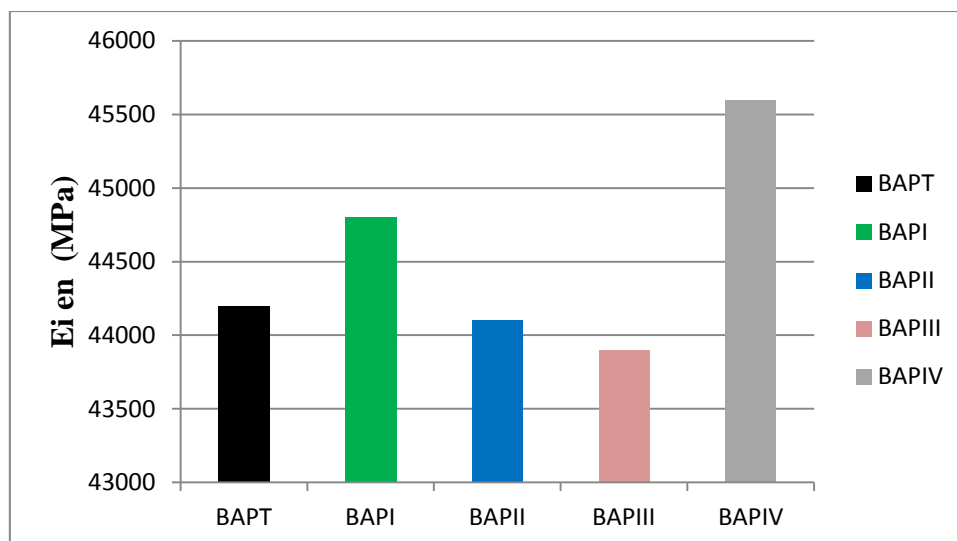


Figure V.12: Module d'élasticité en fonction du type de BAP à 28 jours

#### Commentaire :

La figure V.12 représente la variation du module d'élasticité des différents bétons autoplaçants. On remarque que le **BAP<sub>IV</sub>** avec un ajout combiné d'additions (**2,5%FC** et **7,5%FS**) améliore le comportement mécanique de l'ordre **3,16%** comparé au **BAPT**. Le **BAPI** affiche une amélioration d'environ **1,35%** avec **10%** de dosage en substitution (**FS**) ; donc on peut déduire que l'augmentation de dosage de **FS** donne une meilleure homogénéité

entre les grains. Par contre les autres types des **BAP**, et on remarque une réduction de l'ordre **0,22%** pour **BAP<sub>II</sub>** de (**5%FS+5 %FC**), et une réduction de l'ordre **0,67%** pour **BAP<sub>III</sub>** de (**2,5%FS et 7,5% FC**) comparés au **BAPT**, ce qui explique le rôle de la nature de l'addition ainsi que l'effet de dosage de ce dernier sur les propriétés mécaniques des **BAP**.

#### V.5 Essais non destructifs(END) :

Le tableau ci-après présente les résultats des essais non destructifs (END) ultrason et scléromètre des différents BAP étudiés.

**Tableau .V.11 Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP étudiés à 28 jours.**

Type de béton	Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP étudiés à 28 jours.					
	Scléromètre		Ultrason			
	(Is)	Moy	T (µs)	Moy	V (Km/s)	Moy
<b>BAP<sub>T</sub></b>	40,33	38,74	67,3	66,86	4,75	4,78
	36,58		66,5		4,81	
	39,33		66,8		4,79	
<b>BAP<sub>I</sub></b>	35,5	35,16	69,4	69,46	4,61	4,60
	35,83		69,9		4,58	
	34,16		69,1		4,63	
<b>BAP<sub>II</sub></b>	35,75	37,38	66,7	66,6	4,79	4,8
	37,41		65,8		4,86	
	39		67,3		4,75	
<b>BAP<sub>III</sub></b>	36,16	37,83	66,2	67	4,83	4,77
	36,16		67,6		4,73	
	39,83		67,2		4,76	
<b>BAP<sub>IV</sub></b>	37,66	37,43	66,8	67,36	4,79	4,74
	38,09		68,3		4,68	
	36,54		67		4,77	

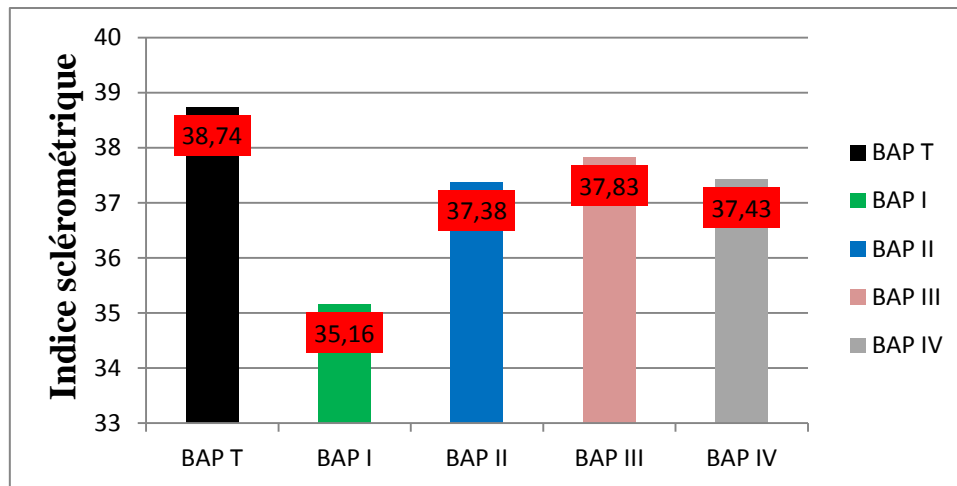


Figure V.13: Evaluation de l'indice sclérométrique pour les BAP étudiés.

Commentaire :

À titre de comparaison, la figure V.14 représente l'histogramme des valeurs de l'indice sclérométrique des différents bétons autoplaçants en fonction de l'âge. Ce graphe montre que le **BAP<sub>I</sub> (10%FS)**, donne la plus petite valeur **Is(35,16)** diminué par **9,24%** par rapport de **BAP<sub>T</sub>** à **28** jours d'âge. Nous notons également une baisse convergente pour les mélanges **BAP<sub>I</sub>**, **BAP<sub>III</sub>** et **BAP<sub>IV</sub>** diminué par **3,08%** **BAP<sub>T</sub>**.

D'après les résultats obtenus, on peut dire que le même développement de résistance est constaté pour les essais (END) d'une manière similaire à celle de l'essai direct d'écrasement de la résistance caractéristique à la compression à **28** jours.

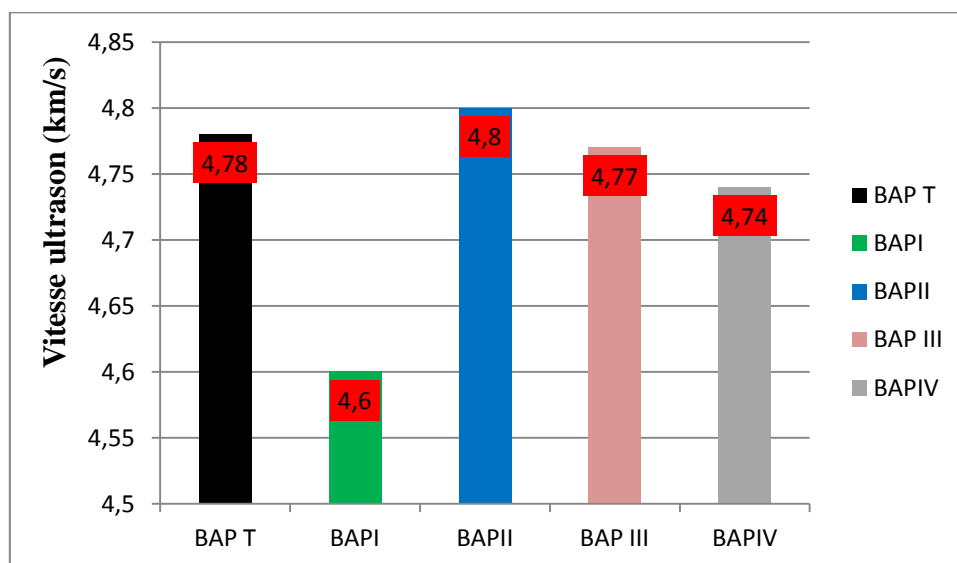


Figure V.14: Vitesse ultrason en fonction du type de BAP

**Commentaire :**

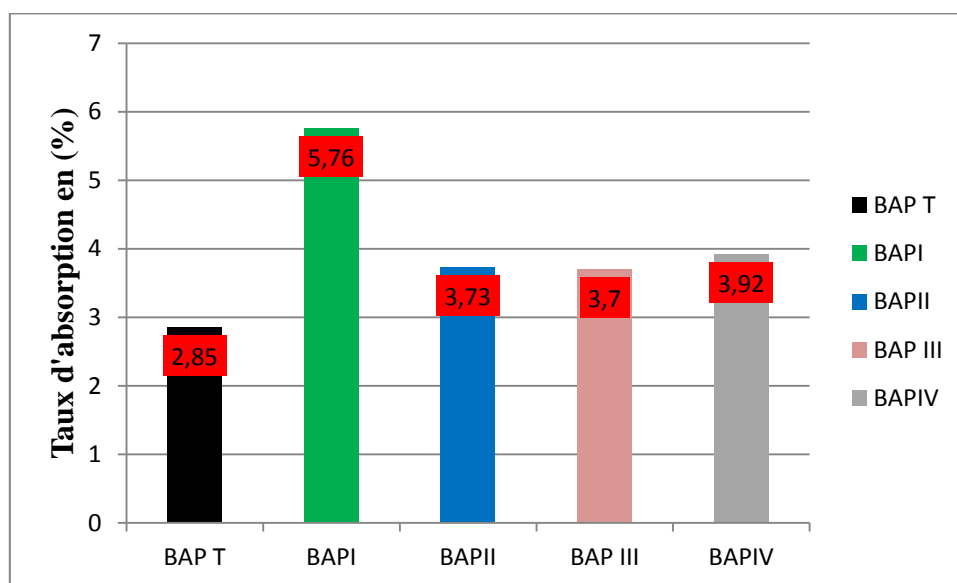
Selon la figure V.15, on remarque une vitesse de propagation du son qui est au-delà de 4,8Km/s, ce qui implique une qualité de béton acceptable. Cependant, on peut dire que les conditions de déroulement de l'essai peuvent affecter les résultats obtenus de la vitesse ultrason et parfois même être contradictoire à valeurs obtenues de résistances à la compression (écrasement) ou en fonction de l'indice sclérométrique ; ces résultats tout de même restent indicatifs. Toujours on fonction du dosage des additions soit **FS** ou **FC** il y a une amélioration selon l'âge de bétons à **28** jours par rapport le **BAP<sub>T</sub>**.

**Remarque [57] :**

- L'utilisation de la vitesse ultrasonore ou du rebond comme seule mesure d'END ne permet pas d'évaluer précisément la résistance des bétons.
- La combinaison des essais ultrason et rebond permet de réduire l'incertitude sur l'évaluation de la résistance mécanique.

**V.6. Essai pour la durabilité :****V.6.1. L'absorption :****Tableau V.12: Résultat de l'absorption capillaire (A) pour les BAP étudiés.**

Type de béton	Taux d'absorption en (%) à 28 (jours)				
	BAP <sub>T</sub>	BAP <sub>I</sub>	BAP <sub>II</sub>	BAP <sub>III</sub>	BAP <sub>IV</sub>
$\omega$ (%)	2,85	5,76	3,73	3,70	3,92

**Figure V.15: L'absorption (A) des différents BAP étudiés.**

**Commentaire :**

Le **BAP<sub>I</sub>** indique un taux d'absorption maximal de **5,76% (10%FS)**, suivi du **BAP<sub>IV</sub>** à une valeur de **3,92% (2,5%FC et 7,5% FS)** et **BAP<sub>II</sub>** une valeur de **3,73% (5%FS et 5% FC)** et **BAP<sub>III</sub>** une valeur de **3,70%(2,5%FS et 7,5% FC)**, avec une augmentation de **101%, 37,53%, 30,87%** et **30,17%**, respectivement par rapport au béton de référence **BAP<sub>T</sub>**. Ceci, peut être expliqué par une porosité importante ou une présence de vides rempli par l'eau après immersion d'une part liée au type d'addition et le dosage. Autres mélanges semblent enregistrer des valeurs proches ou inférieures à celles du **BAP<sub>T</sub>**. Cette variation de taux d'absorption se traduit selon [57]:

- Par l'effet de l'ajout de fumée de silice par différents pourcentages, demande en eau importante par rapport au ciment.
- Les fillers calcaires ne réagissent pas ou peu chimiquement avec les composants du ciment ou l'eau de gâchage, de nature inerte. Une faible influence sur la demande en eau.

**V.7 Conclusion :**

Le cinquième chapitre est consacré aux résultats et analyses obtenus lors de cette étude ainsi que les intérêts techniques d'un BAP témoin et autre différents type de BAP.

Cette étude a pour objectif d'évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton autoplaçant avec l'ajouts de deux types d'addition minérales(fumé de silice et fillers de calcaire) avec différents pourcentages de fumé de silice et filler de calcaire, pour voir l'influence de la nature, et le pourcentage de l'additions sur les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci.

Pour l'influence de pourcentage de filler et d'après les résultats, on observe avec l'augmentation du dosage de filler du béton une amélioration les propriétés rhéologiques. Le béton autoplaçant **BAP<sub>III</sub>** à donner une meilleure rhéologie (bon étalement, bonne résistance à la ségrégation, et bonne stabilité au tamis, le **BAP<sub>IV</sub>** donné une meilleure réponse mécanique.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Les résultats obtenus des tests sur des éprouvettes en BAP formulés en utilisant les deux types des fillers( fumé de silice et filler de calcaire),et après discussion ont permis les conclusions suivantes d'être tirées ;

Etat frais :

- Les ajouts minéraux jouent un rôle important dans l'amélioration des caractéristiques rhéologiques du béton autoplaçant (étalement, stabilité au tamis et taux de remplissage) tous les BAP testés ont donné des valeurs acceptables.
- L'augmentation du dosage en fumé de silice combiné avec des fillers de calcaire donne une augmentation légère de l'étalement et qui reste similaire au BAP témoin.
- L'augmentation du taux d'addition de fumée de silice au delà de 10 % s'avère affecter les performances rhéologiques des BAP étudiés.
- La nature et la finesse de l'ajout (fumée de silice) ont un effet sur le seuil de cisaillement et la viscosité du béton auto plaçant mesurés par rhéomètre et qui reste dans les recommandations des normes en vigueur (ASTM C 1610).

Etat durci :

- L'utilisation du super plastifiant « MEDAFLOW 30 »et fumée de silice dans les formulations de bétons peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique. Le **BAP<sub>IV</sub>** donne la meilleure réponse mécanique comparé aux autres types et au témoin.
- L'utilisation des fumées de silice et calcaire en différents pourcentages combiné avec des fillers de calcaire améliorent le comportement mécanique tel que (La traction par fendage, compression et module d'élasticité) grâce à leur surface spécifique élevée qui donne une meilleure compacité du béton (effet filler) entre les particules.
- L'ajout de fumée de silice augmente l'absorption de l'eau beaucoup plus que le filler de calcaire est ce pour tous les mélanges étudiés, le dosage optimal de (2,5FS+7,5FC) combiné semble donner le plus faible taux d'absorption.
- A titre de combinaison, les essais ultrason et scléromètre ont permis de réduire l'incertitude quant à l'évaluation de la résistance mécanique. L'augmentation de dosage de la fumée de silice donne une meilleure vitesse de propagation et indice sclérométrique ; ce qui implique des BAP de bonne qualité par rapport à l'utilisation des fillers de calcaire.

-

Enfin, On peut conclure que l'utilisation des additions de la fumée de silice, surtout combiné avec des fillers de calcaire et associé à des super plastifiants demeure avantageuse afin de produire des BAP ayant des performances rhéologiques, mécaniques et en terme de durabilité meilleures en comparaison avec un béton de référence.

▪ **perspectives**

Alors que sur le plan technique le fumé de silice peut remplacer avec succès les fillers calcaires.

Les travaux qui ont été réalisés ont permis d'apporter quelques éléments de réponses aux préoccupations posées, mais ils ont soulevé aussi quelques points intéressants à explorer à l'avenir.

Afin de mieux comprendre les différentes facettes du comportement de ce nouveau type de béton, il serait intéressant d'étudier d'autres propriétés à l'état durci.

- Etude microstructurale des matrices cimentaires à base de ces ajouts DRX, MEB
- Etude de corrélation pour voir l'effet d'interaction entre les différents facteurs qui influence la réponse mécanique mesurée (résistance à la compression).

## Références

- [1] **OKAMURA H.ET AL**, “*self-compacting high performance concrete*” *Proceeding of the fifth sec vol.3*, pp.2381-2388, 1995.
- [2] **A. HAMOUINE** « *Contribution à l'étude de l'adhérence acier-béton de hautes performances* » *Thèse de doctorat, INSA TOULOUSE* 1996.
- [3] **Mme Ben akili Sarah**, « *caractérisation expérimental des bétons autoplaçant obtenus par ajout des déchets de construction* », *thèse de magister université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou* 2009.
- [4] **Yagoub.M**, « *matériaux de construction (chapitre 2)* », *cours en génie civil, université Mohamed Khaider à Biskra*, 2009.
- [5] **NF EN 197-1**, « **ciment, composition et critères** », *l'association française de normalisation, Février* 2001.
- [6] **Khélifa.R**, « *influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons* », *thèse de magister, université Mentouri de Constantine, 11 Juillet* 2001.
- [7] **CIM béton**, « *le ciment et ses applications* », *10<sup>ème</sup> édition, a principe Paris, Juillet* 2001.
- [8] **NF P 15-010**, *Guide d'utilisations des ciments*, *Octobre* 1997.
- [9] **Hanaa Fares**. « *Propriétés mécaniques et physicochimiques De bétons autoplaçants exposés à une température élevée*», *thèse de doctorat en Génie Civil, université de Cergy-Pontoise, le 07 Décembre* 2009.
- [10] **Collection Technique CIM béton, Fiches techniques, Tome 2** ", *Les bétons : formulation, Fabrication et mise en œuvre* ", *Édition octobre* 2006.
- [11] **Boudchicha Abdelaziz**, « *utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécanique des bétons*», *thèse doctorat, université Mentouri à Constantine, Décembre* 2007.
- [12] **Merniz Mohamed**, « *étude de l'influence de la nature et les dimensions des fibres sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants (BAP)* », *mémoire master, université Mohamed Boudiaf à M'sila*, 2015.
- [13] **ZHU et GIBBS**, « *Use of different limestone and chalk powders in self-Compacting concrete* », *Cement and concrete research, vol 35*, pp1457-1462, 2005.

[14] **Chatra Yassine**, « *effet des fillers de calcaire sur le comportement d'un béton auto plaçant (BAP) à base des matériaux locaux* », mémoire master, université Mohamed Boudiaf à M'sila, juin 2016.

[15] **Turcry.P, Loukili. A**, "Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants : incidence sur les caractéristiques rhéologiques", *Forum des associations AFGC/AUGC/IREX : innovation et développement en génie civil et urbain - nouveaux bétons*, Toulouse, 30-31 mai 2002.

[16] **KASMI ZIN EDDINE**, « *Propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons autoplaçant fibrés exposés à haute température* », thèse de magister université de Mohammed Boudiaf-M'sila 2014.

[17] **Projet National de Recherche CERIB**, " *béton autoplaçant BAP* " France, Article de presse du BTP, 12 Octobre 2001.

[18] **Ali Bouzidi**, « *généralité sur les adjuvants* », cours en génie civil, université M'Hamed Bouguerra Boumerdes, Décembre 2016.

[19] **Petersson.O, Billberg.P, Van.B.K**, "A model for self-compacting concrete", *Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete*, Paisley, Ecosse, 1996.

[20] **Petersson.O, Billberg .P**, "Investigation on blocking of self-compacting with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler" , *Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Suède, pp. 333-344, 1999.

[21] **Billberg.P**, "Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience", *Report 2: 99*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1999.

[22] **Turcry.P**, " *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation*", Thèse doctorale, université de Nantes, 2004.

[23] **Ozawa.K, Tangtermsirikul.S, Maekawa. K**, "Role of powder materials on the filling capacity of fresh concrete", *Proceedings of the 4th CANMET/AI Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Istanbul, Torque, pp. 121-137, 1992.

[24] **Banfill PFG** "Structure and Rheology of Cement-Based Systems", *Materials Research Society Symposium Proceeding*, 1993, Vol. 289, pp. 149-166.

[25] **Colleparidi.M** "The Rheological Behavior of Cement Pastes", *IL Cement*, 1971, Vol. 68, pp. 99-10.

[26] **Laifa Walid**, « *contribution à l'étude des effets du laitier cristallisé et des fibres de disse sur les propriétés des bétons autoplaçant* », thèse doctorat, université Badji Mokhtar à Annaba, 2015.

- [27] **Gadri.Attala**, « *étude des caractéristiques physico-mécaniques des bétons de sable à base de fumée de silice* », thèse doctorat, université Mohamed K Haider à Biskra, 2014.
- [28] **Hermann Kurt**, « *les ajouts : les fumées de silice* », *Bulletin du ciment*, Vol 63, 1995.
- [29] **Patricia Bredy Tuffé**, « *solutions de bétons* », 1er édition, Paris, 2011.
- [30] **persoz, B** « *Introduction à l'étude de la rhéologie* », paris, Dunod, 1960.
- [31] **Beaupré, D.** « *Rheology of High performance Shotcrete* », *ph.D.Thesis, University of British Columbia*, 1994
- [32] **Couarraze G. and Grossiord J.L.1983** “*Initiation à la Rhéologie*», *Lavoisier, paris*.
- [33] **Coussot, p. (2012)**. «*Comprendre la rhéologie : de la circulation du sang à la prise du béton*» *EDP Sciences*
- [34] **Shaughnessy, R, R ET Clark, p. E. (1988)**. “*THE Rheological behavior of fresh cement pastes.*”
- [35] **Roshavelov T.** « *prediction of fresh concrete flow behavior based on analytical model for mixture proportioning* ». *Cem concert RES* 2005; 35:831-5.
- [36] **Hu, C.**, « *Rhéologie des bétons fluides* » .1995, *Ecole Nationale des ponts et chaussées : paris. P.201.*
- [37] **Papo, A. (1988)**. *Rheological models for cement pastes. Materials and Structures*, 21(1), 41-46.
- [38] **Ghazal, A. (1999)**. *Modélisation statistique du comportement des bétons autoplaçant & optimisation. University de Sherbrooke.*
- [39] **Ferraris, C. F. (1999)**. *Measurement of the rheological properties of cement paste: a new approach. International RILEM Conference on the Role of Admixtures in High Performance Concrete (p. 333-342).*
- [40] **Barnes H.A. (2000)**: *A Handbook of elementary rheology. Institute of Non Newtonian Fluid Mechanics. University of Wales, 200 pages.*
- [41] **Beaupre D. (1994)**: *Rheology of high performance Shotcrete. PhD thesis. University of British Columbia, Canada, 250 pages.*
- [42] **Coussot, P. (2012)**. *Comprendre la rhéologie: de la circulation du sang à la prise du béton. EDP Sciences.*
- [43] **Felekoğlu, B., Türk el, S., Baradan, B., Felekoğlu, B., Türkel, S. et Baradan, B. (2007)**. *Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. Building and Environment*, 42(4), 1795-1802.
- [44] **Feys, D., Verhoeven, R. ET De Schutter, G. (2007)**. *Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh self-compacting concrete Applied Rheology* 17(5), 1-10.

[45] **Mezghiche Bouzidi**, « *norme, matériaux, mélanges et essais utilisées* », cours de 3<sup>ème</sup> année licence, université Mohamed Khaider, Biskra, 2013.

[46] **NETTAH ZOHIR ET MESSADI DJAMEL**, « *l'effet de fillers de marbre sur la réponse mécanique d'un béton à base d'agrégats recyclé* », PFE Ingéniorat, 2006, département de génie civil, université de M'sila, Algérie.

[47] **Saïd BENCHERAI**: « *Étude des techniques de renforcement des structures en béton arme contreventées par portiques auto stables* » Mémoire de fin d'étude, 2007, Université Abed Rahman MIRA de Bejaia.

[48] **DREUX.G ET FESTA.J**: « *Nouveaux guide du béton et de ces constituants* », Ed. Eyrolles, 1998.

[49] **DEGHFEL MOUSSA, 2010** : « *Application de l'essai de dureté pour la caractérisation du béton* », Mémoire de Magistère, Université de M'SILA.

[50] **AYADL.B et HAMMACHE.Y**: « *Effet des fillers de calcaire sur le retrait d'un béton à base d'agrégats recyclés adjuvante* », mémoire Master 2, 2012, Département de génie civil, Université de Bordj Bou Arreridj, Algérie.

[51] **M. Adjoudj, K. Ezziane, El. Kadri** « *Effet de fumé de silice sur la rhéologie des mortiers en présence d'un superplastifiant* », CiMDD'2013,06 au 09mai 2013, université M'Hamed Bougara Boumerdes.

[52] **Soufiane BELLIFA, Fouad GHOMARI, Mohammed Amine BOUKLI HACENE, Omar TALEB** « *influence des fillers calcaire sur la porosité et la distribution porale des pâtes autoplaçants* », Etude Et Analyse De La Formulation Des Bétons Auto plaçants Par La Méthode De La Pâte En Excès, laboratoire Eau et ouvrage dans leur environnement BP230, université de Tlemcen,13000,Algérie.

[53] **BOUREZG WALID** « *Etude de l'effet de mode de cure sur le comportement d'un béton auto plaçant (BAP) à bas de ciment ternaire* », mémoire de fin d'étude master m'sila 2017.

[54] **Chatra Yassine**, « *effet des fillers de calcaire sur le comportement d'un béton auto plaçant (BAP) à base des matériaux locaux* », mémoire master, université Mohamed Boudiaf à M'sila, juin 2016.

[55] **TALER OMAR**, « *Etude de comportement Rhéologique des bétons autoplaçants locaux* », mémoire de fin d'étude, université Aboubakar Belkaid-Tlemcen-faculté Technologie ,2017.

**[56] Gadri.K, Guettala.A,** « *évaluation du module d'élasticité à la compression à l'aide des techniques non destructives* », 2<sup>ème</sup> congrès français de mécanique, Lyon, 28 aout 2015.

**[57]Bellifa Soufyane,** « *évaluation de la porométrie des pates autoplaçants* », mémoire magister, université Abou Bekr Belkaid à Tlemcen, mars 2012.