

**Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique
Université Mohamed Boudiaf - M'sila
Faculté de technologie**



**FILIERE : *Génie Civil*
SPECIALITE : *Matériaux***



**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master**

Par: Alaeddinne Yaiche

Intitulé

**Caractérisation d'un béton autoplaçant a base de
poudre de marbre**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. BAKIR Nassima	Université de M'sila	Président
Dr. ZITOUNI Salim	Université de M'sila	Examineur
Dr. BELAGRAA Larbi	Université de M'sila	Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

Remerciements

الحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات

Je remercie mon directeur de thèse, Monsieur belagraa laarbi, professeur à l'Université de M'sila, pour avoir été encadrant de ces travaux. Je lui adresse mes remerciements les plus sincères pour m'avoir guidé, conseillé, encouragé, supporté durant toute la durée de la préparation de ma thèse, pour m'avoir appris à faire de la recherche et à travailler en groupe, je remercie beaucoup.

J'exprime ma gratitude à l'ensemble du personnel technique et administratif de l'Université de M'sila pour leur disponibilité, gentillesse et à tous ceux qui ont indirectement participé à l'élaboration de cette thèse.

Il me serait impossible, enfin, de ne pas saluer ma famille et mes amis pour le soutien et les encouragements qu'ils n'ont cessé de me prodiguer, tout au long de cette entreprise.

Dédicace

à ma famille

à mes amis

et à tous les
enseignants

de Département de
génie civil

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé

Les bétons auto plaçant se distinguent par une fluidité extrême, permettant leur mise en place sans vibration. Les additions minérales et les adjuvants sont deux composants indispensables pour la formulation des bétons auto plaçant (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.

. Toutefois, pour réduire le coût de production des BAP, le liant est souvent un composé binaire voire ternaire : ciment Portland mélangé avec poudre de marbre, poudre de verre, fumée de silice, cendres volantes, etc.

L'objectif de cette étude est de montrer l'influence de l'ajout de poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques à l'état frais et la résistance mécanique à l'état durci. On a effectué des essais de mesure de rhéologie sur béton à base d'ajout de poudre de marbre à des taux variables de 5,10,15 et 20% de la masse du ciment.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du dosage en poudre à une influence significative sur le développement des résistances, voire même, une diminution de l'absorption, pour un taux d'ajout supérieur à 15%.

Mots clés : béton autoplaçant (BAP), poudre de marbre , propriétés rhéologiques, résistance mécanique.

Abstract

Self-placing concretes are characterized by an extreme fluidity, allowing their placement without vibration. Mineral additions and admixtures are two essential components for the formulation of self-placing concrete (SPC); they are the two components that govern the rheological behavior of these concretes. The mineral additions are introduced into the concrete to improve its rheological behavior in the fresh state, but also to participate in the mechanical properties and durability of the concrete. However, to reduce the production cost of the BAP, the binder is often a binary or even ternary compound: Portland cement mixed with marble powder, glass powder, silica fume, fly ash, etc.

The objective of this study is to show the influence of the addition of marble powder on the rheological properties in the fresh state and the mechanical resistance in the hardened state. Rheology measurement tests were carried out on concrete based on the addition of marble powder at variable rates of 5, 10, 15 and 20% of the mass of the cement.

The results obtained show that increasing the powder dosage has a significant influence on the development of resistance, or even a decrease in the absorption indicating sustainable concrete, for an addition rate greater than 15%.

Keywords: self-compacting concrete , poudre de marbre, rheological, mechanical resistance.

ملخص

تتميز الخرسانة ذاتية الوضع بالسيولة الشديدة ، مما يسمح بوضعها دون اهتزاز. الإضافات والمواد المساعدة المعدنية مكونان أساسيان لتشكيل الخرسانة ذاتية الصب ؛ هذان هما المكونان اللذان يحكمان السلوك الريولوجي لهذه الخرسانة. يتم إدخال الإضافات المعدنية في الخرسانة لتحسين سلوكها الريولوجي في الحالة الجديدة ، ولكن أيضاً للمشاركة في الخواص الميكانيكية ومتانة الخرسانة.

الهدف من هذه الدراسة هو إظهار تأثير إضافة مسحوق الرخام على الخواص الريولوجيا في الحالة الطازجة والمقاومة الميكانيكية في الحالة المتصلبة. تم إجراء اختبارات قياس الريولوجيا على الخرسانة بناءً على إضافة مسحوق الرخام بمعدلات متغيرة 5 و 10 و 15 و 20٪ من كتلة الإسمنت.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن زيادة جرعة المسحوق لها تأثير كبير على تطور المقاومة ، أو حتى النقصان للحد من الامتصاص ، لمعدل إضافة أكبر من 15٪ مسحوق الرخام من كتلة الاسمنت.

مفتاح: خرسانة ذاتية التموضع, مسحوق الرخام, الخصائص الريولوجية, المقاومة الميكانيكية.

Table des matières

Introduction général	1
Objectifs de l'étude.....	2
Plan du travail.....	3

CHAPITRE I : Notions générales sur le béton

I.1 Introduction	3
I.2 DEFINITION.....	3
I.3 Les principaux constituants d'un béton autoplaçant	4
I.3.1 Le ciment	4
I.3.2. Les granulats :.....	4
I.3.3. Eau	5
I.3.4. Additions minérales.....	5
I.3.4.1 Différents types d'additions minérales	6
I.3.4.1.1 Fillers (poudre de marbre)	6
I.3.4.1.2. Adjuvants (superplastifiants)	6
I.4. Formulation d'un béton autoplaçant	7
I.4.1. Approches de formulation	7
I.5. Caractérisation des bétons Autoplaçants	8
I.5.1. Caractérisation des bétons Autoplaçants à l'état frais	8
I.5.1.1. Essai d'étalement	9
I.5.1.2. Essai de boîte en L	9
I.5.1.3. Essai de stabilité au tamis	9
I.5.2. Caractérisation des bétons Autoplaçants à l'état durci	10
I.5.2.1. Résistance mécanique	10
I.5.2.2. Le module élastique	10
I.5.2.3. Retrait	11
I.6. Propriétés physico-chimique et durabilité d'un BAP	11
I.6.1. Absorption capillaire	11
I.6.2. Carbonatation	11
I.7. Domaine d'application de BAP	12
I.8. Avantages et inconvénients d'un béton autoplaçant	12
I.8.1. Avantages	
I.8.2. Inconvénients.....	12
I.9. La poudre de marbre	12
I.9.1. Effet de la poudre de marbre sur les qualités des ciments.....	13
I.9.2. Effet de la poudre de marbre sur les propriétés physiques.....	13
I.9.3. Effet sur la porosité.....	14
I.9.4. Réactivité indirecte de la poudre de marbre.....	14
I.9.5. Réactivité directe de la poudre de marbre.....	14
I.9.6. Effet de la poudre de marbre sur les aspects rhéologiques:.....	15

I.10.	Le MEDAFLOW 30.....	15
I.10.1.	Description.....	15
I.10.2.	Domaines d'application.....	15
I.10.3.	Propriétés.....	16
I.10.4.	Dosage et mode d'emploi.....	16
C.	Conclusion.....	17

CHAPITRE II : Généralités sur les essais destructifs et non destructifs

II.1.	Introduction.....	18
II.2.	Les méthodes d'essai destructif sur le béton.....	18
II.2.1.	Essai de compression simple.....	18
II.2.2.	Essai de traction par flexion.....	19
II.3.	Les méthodes d'essais non-destructifs sur le béton.....	20
II.3.1.	Essai au Scléromètre.....	20
II.3.1.1.	Principe [NF EN 12504-2].....	20
II.3.1.2.	Les étapes pour tester le Scléromètre.....	21
II.3.1.3.	Les avantages de l'essai Sclérométrique.....	22
II.3.1.4.	Les inconvénients de l'essai Sclérométrique.....	22
II.3.1.6.	Mesures sur éprouvettes	22
II.3.1.6.	Exploitation des résultats.....	23
II.3.2.	Essai d'auscultation dynamique.....	23
II.3.2.1.	Principe [NF EN 12504-4].....	23
II.3.2.2.	Détermination de la vitesse de propagation des ondes.....	24
II.3.2.3.	Manières de mesure.....	24
II.3.2.4.	Les avantages d'essai d'auscultation dynamique.....	25
II.3.2.5.	Les inconvénients d'essai d'auscultation dynamique.....	25
II.4.	Méthodes combinées.....	25
II.4.1.	Principe.....	26
II.4.2.	Les avantages des méthodes combinées.....	26
II.4.3.	Les inconvénients des méthodes combinées.....	27
II.5.	Conclusion.....	27

CHAPITRE III : Caractéristiques des Matériaux utilisés

III.1.	Introduction.....	28
III.2.	Matériaux utilisés.....	28
III.3.	Caractéristiques des matériaux utilisés.....	28
III.3.1.	Caractéristique du ciment utilisé	28
III.3.1.1.	Caractéristique physique	28
III.3.1.2.	Caractéristiques chimiques du ciment utilisé	29
III.3.1.3.	Les caractéristiques minéralogiques	28
III.3.2.	Caractéristiques du sable utilisé	29

III.3.2.1. Caractéristique chimique du sable	29
III.3.2.2. Essai d'analyse granulométrique [NF EN 933-1].	29
a) Module de finesse [NF EN 12620]	30
III. 3.2.2. Caractéristiques physiques du sable utilisé	31
a) Masse volumique absolue [NF EN 1097-7].....	31
b) Masse volumique apparente [NF EN 1097-6]	32
III.3.2.1. Origine du gravier utilisé	37
III.3.3 Caractéristique du gravier utilisé	37
III.3.3.1 Origine du gravier utilisé	37
III.3.3.2 Caractéristiques physiques du gravier utilisé	37
a) Masse volumique apparente [NF P 18-554]	37
b) Masse volumique absolue	38
c) Compacité, porosité et l'indice de vide [NF EN 1097-4]	39
III.3.3.3 Analyse granulométrique	39
III.4 Les Adjuvants	40
III.4.1 Description	40
III.4.2 Domaines d'application	41
III.4.3 Propriétés	41
III.4.4 Dosage et mode d'emploi	42
III.5 Le filler utilisé (Poudre de marbre)	42
III.6 Caractéristiques de l'eau de gâchage	43
III.6.1 Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée	43
III.7 Conclusion	43

Chapitre IV: Techniques Expérimentales

IV.1. Introduction.....	45
IV.2. Formulation du béton autoplaçant.....	45
IV.2.1. Méthode française.....	45
IV.2.2. Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC.....	46
IV.3. Procédure de fabrication des éprouvettes	47
IV.4. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais	48
IV.4.1. Essai d'étalement au cône d'abrams [NF EN 12 35].....	48
IV.4.2. Essais de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11]	48
IV.4.3. Essais de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10]	49
IV.5. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci.....	50
IV.5.1. Essais de compression [NF EN 206-1]	50
IV.5.2. Essais traction par flexion [NF EN P 18-408]	50
IV.5.3. Module d'élasticité	51
IV.5.4. Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NF EN 12398]	51
IV.5.5. Les ultrasons [NF EN 12504-4]	51
IV.6. Confection des éprouvettes.....	52
IV.6.1. Type et tailles des moules	52
IV.6.2. Conservation des éprouvettes	53

IV.7. Conclusion.....	53
-----------------------	----

Chapitre V : Résultats et Discussions

V.1. Introduction	55
V.2. Les formulations des bétons étudiés	55
V. 3. Présentation des résultats	55
V.3.1. Résultats des essais à l'état frais	55
V.3.2. Caractérisation des bétons à l'état durci	59
V.3.2.1. Résistance à la traction par flexion (Rt)	59
V.3.2.2. Résistance à la compression (Rc).....	61
V.4. Module d'élasticité statique (Ei).....	62
V.5. Essai non destructifs (END).....	63
V.6. Essai pour la durabilité.....	63
V.6.1. L'absorption (A).....	65
V.7. Conclusion	65
Conclusion générale et perspectives.....	66
Références bibliographiques	

Liste des figures

Chapitre I : Revue générale sur le béton autoplaçants

Figure I.1 Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP	4
Fig I.2 : Figure I.2 Poudre du marbre utilisé	6
Fig I.3 : L'effet du superplastifiant sur les grains de ciment	7
Fig I.4 : approche générale de formulation des BAP	8
Fig I.5 : Résistance en compression d'un BAP par rapport des autres bétons	10
Fig I.6 : Retrait spécifique des différents mélanges de bétons [12]	11

Chapitre II : Généralités sur les essais destructifs et non destructifs

Fig II.1 : Dispositif pour mesurer la résistance à la compression	19
Fig II.2 : Dispositif pour mesurer la résistance à la traction par flexion	19
Fig II.3 : L'appareil de scléromètre [24].	20
Fig II.4 : Principe du Scléromètre	20
Fig II.5 : La résistance probable du béton en fonction de la mesure du recul (linéaire ou angulaire)	21
Fig II.6 : a) Mesure sur surface béton, b) sur éprouvette cubique (10*10*10) cm ³ [19]	23
Fig II.7 : Appareil d'auscultation sonique	23
Fig II.8 : Courbe d'estimation de la résistance in situ par utilisation conjointe de la mesure de propagation d'ondes ultrasoniques et les résultats Sclérométrique selon [Bellander, 1977] [19]	26

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

Fig III.1 : Appareil de l'analyse granulométrique	30
Fig III.2 : La courbe granulométrique du sable de Boussaâda	31
Fig III.3 : Principe de l'équivalent de sable	35
Fig III.4: Essai équivalent de sable exécuté au laboratoire	35
Fig III.5: Courbe analyse granulométrique d'un gravier de deux fraction (3/8, 8/16).	40
Fig III.6: Poudre du marbre utilisé.	42

Chapitre IV : Techniques expérimentales

Fig IV.1: Essai d'étalement par cone d'abrams sur les BAP.	48
-------------------------------------------------------------------	-----------

Fig IV.2 : Principe de l'essai stabilité de tamis sur BAP	49
Fig V.3 : Boite en L pour le béton autoplaçant	50
Fig V.4: Essai compression :a) machine et éprouvette, b) éprouvette destructée	50
Fig V.5 : Principe de l'essai traction par flexion	51
Fig V.6 : Principe de l'essai scléromètre	51
Fig V.7 : Appareil ultrason	52
Fig V.9: Type des éprouvettes utilisés :a) prismatique, b) cubique.	52

Chapitre V : Resultats et Discussions

Fig V.1: L'étalement en fonction du type de béton	55
Fig V.3: Le taux de remplissage en fonction de type de béton	56
Fig V.3: L'indice de ségrégation dynamique en fonction du type de BAP (L-box test)	56
Fig V.4: Évolution de la Résistance à la traction par flexion en fonction du type du béton à 28 jours.	57
Fig V.5: Evaluation de la résistance à la compression en fonction de l'age des BAP	59
Fig V.6: Evaluation du module d'élasticité en fonction du type de BAP à 28 jours	60
Fig V.7: Evaluation de l'indice sclérométrique en fonction de l'age pour les BAP étudiés	62
Fig V.8: Evaluation de vitesse de propagation des ondes en fonction de type de BAP	62
Fig V.9: Evaluation de taux d'absorption (A) des différents BAP étudiés	64

Liste des tableaux

Chapitre I : Revue général sur le béton autoplaçants

Tab I.1 : Caractéristique de l'adjuvant« MEDAFLOW 30 ».	15
Tab I.2 : Propriétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci.....	16
Tab I.3 : Résistance à la compression obtenue par le « MEDAFLOW 30 ».....	16

Chapitre II : Généralités sur les essais destructifs et non destructifs

Tab II.1 : Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions selon Leslie.....	24
-----------------------------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

Tab III.1 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé.....	28
Tab III.2 : Les compositions chimiques.....	29
Tab III.3 : Les compositions minéralogiques.....	29
Tab III.4 : Les Caractéristiques chimiques du sable.....	29
Tab III.5 : Analyse granulométrique du sable (sable de Boussaâda).....	30
Tab III.6 : Masse volumique absolue du sable de Boussaâda.....	32
Tab III.7 : La masse volumique apparente du sable de Boussaâda.	33
Tab III.8 : la porosité ; la compacité et l'indice des vides pour le sable de Boussaâda.....	34
Tab III.9 : La classification de la nature sable en fonction d'équivalent de sable (E.S).....	36
Tab III.10 : Les résultats d'équivalent du sable de Boussaâda	36
Tab III.11 : Teneur en eau de sable utilisé.....	37
Tab III.12 : Masse volumique apparente du gravier.....	38
Tab III.13 : Masse volumique absolue du gravier	38
Tab III.14 : Porosité, compacité et l'indice des vides.....	39
Tab III.15 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	39
Tab III.16 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.....	40
Tab III.17 : Caractéristique del'adjuvant« MEDAFLOW 30 ».	40
Tab III.18 : Proprétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci.....	41
Tab III.19 : Résistance à la compression obtenue par le « MEDAFLOW 30 ».	41
Tab III.20: Caractéristiques physiques de la poudre de marbre	42
Tab III.21 : Caractéristiques chimiques de la poudre de marbre.....	42

Tab III.22 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau.....	43
----------------------------------------------------------------------	-----------

Chapitre IV : Techniques expérimentales

Tab IV.1 : Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode AFGC.....	47
-----------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Chapitre V : Resultats et Discussions

Tab V.1 : Caractéristiques rhéologiques des BAP étudiés	55
----------------------------------------------------------------------	-----------

Tab V.2 : La résistance à la traction par flexion des BAP étudiés (Rt)	57
-------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Tab V.3 : La résistance à la compression (R_c) des BAP étudiés à 7, 14 et 28 jours	58
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Tab V.4 : La résistance à la compression (RC) des BAP étudiés à 28 jours 15x15x15	59
------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Tab V.5 : Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP étudiés	60
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Tab V.6 : Résultat de L'absorption capillaire (A) pour les BAP étudiés	63
-------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Notations

H	Hauteur	M₁	Poids de récipient
II	L'indice de ségrégation	C	La compacité en (%)
R_c	Résistance à la compression en (MPa).	e	L'indice des vides
F	Charge maximale en (KN)	P	Porosité en (%)
S	Surface de l'éprouvette en (cm ²)	W	Teneur en eau en (%)
R_t	Résistance à la traction en (MPa)	L_A	Coefficient de Los Angles (%)
I_s	L'indice sclérométrique	PM	Poudre de marbre
D_{max}	Dimension des granulats	t	Le temps en (μs)
E_i	Module d'élasticité statique en (MPa)	SSB	Surface spécifique de Blaine
v	Coefficient de poisson	SP	superplastifiants
ρ_{app}	La masse volumique apparente (Kg/m ³)	F_t	Charge à la flexion en (KN)
V	Vitesse de propagation des ondes en (m/s)	ε	La déformation linéaire
BAP	Béton autoplaçants	σ	La contrainte en (MPa)
BO	Béton ordinaire	M_f	Module de finesse
R_c	Résistance à la compression en (MPa).	E_{sv}	Equivalent de sable visuel en (%)
F	Charge maximale en (KN)	E_{sp}	Equivalent de sable piston en (%)
S	Surface de l'éprouvette en (cm ²)	BAP_R	Béton autoplaçant recyclé
f_t	Résistance à la traction en (MPa)	I	L'indice hydraulique
I_s	L'indice sclérométrique	ρ_{abs}	Masse volumique absolue
E_d	Module d'élasticité dynamique en (MPa)	h₁	Hauteur (sable + flocculat)
v	Coefficient de poisson	h₂	Hauteur du sable en (cm)
ρ	La masse volumique du béton en (Kg/m ³)	R_c	Refus cumules des tamis
V	Vitesse de propagation des ondes en (m/s)	NF	Norme française
E/C	Rapport eau sur ciment	EN	Norme européenne
FS	Fumée de silice	BHP	Béton haut performance
GBR	Granulats de béton recyclée	MEB	Micro-électronique à balayage
R_c	Refus cumulé	CSH	Silicate de calcium hydraté
M_s	Poids du sable sec en (g)	Ca(OH)₂	La portlandite
M_h	Poids du sable humide en (g)	END	Essai non-destructifs
V_r	Volume de récipient (cm ³)	ED	Essai destructifs
M₂	Poids de l'ensemble (granulat + récipient)		

Introduction général

Introduction générale

Les bétons autoplaçants BAP (SCC, Self Compacting Concrete) ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était d'augmenter la cadence de travail en réduisant l'effectif du personnel sur le chantier et le temps de mise en œuvre.[Cité par 1]

L'utilisation du béton autoplaçant (BAP) en Algérie est relativement récente, d'où vient l'intérêt d'étudier ses propriétés rhéologiques et mécaniques et de les optimiser, en fonction des matériaux et des conditions locaux. Cette

Etude présente les résultats d'une étude portant sur l'influence de la qualité de l'addition minérale inerte sur les propriétés des BAP frais et durci. Du fait que ce constituant assure une continuité granulaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. Les sables de dunes sont des matériaux très fins caractérisés par une porosité intergranulaire élevée, une grande surface et un faible module de finesse; d'autre part, les sables fins influencent la maniabilité du béton.

Hors, les problèmes du béton ordinaire nécessitent des moyens de vibrations, d'où des moyens et coûts supplémentaires pour le maître d'ouvrage. Le béton autoplaçant est une solution pour faciliter l'écoulement du béton à travers les armatures dans les sections fortement ferrillées. Ce béton (BAP) ayant une composition particulière traduite par la présence d'une grande quantité des ajouts(fillers) et d'adjuvant(Superplastifiants).

L'emploi de certaines additions minérales dans la confection du béton contribue à une accélération du processus d'hydratation du ciment. Ceci engendre une modification de certaines propriétés du ciment à savoir le temps de prise, l'apparition des microfissures et l'évolution des résistances mécaniques à très jeune âge. Ces modifications des propriétés physico-chimiques des composants du béton dues à des additions minérales affectent directement les propriétés rhéologiques du béton frais et ses composants. En effet, cela peut conduire à une mise en place facile ou parfois avec certaines difficultés du fait d'une maniabilité réduite de ce béton.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'exploitation des matériaux locaux, y compris les éléments d'additions, pour la préparation des bétons autoplaçants économiques. Dans ce travail, nous allons étudier des BAP contenant un mélange

inaire de poudre. En plus du ciment, L'addition minérale faisant l'objet de cette étude est la poudre de marbre. Cette dernière est disponible dans le marché algérien, et elle a fait partie de plusieurs travaux de recherches notamment dans notre laboratoire de recherches.

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'apport de la poudre de marbre issu des déchets de marbreries sur le comportement rhéologique à l'état frais et à l'état durci d'un béton auto plaçant. Le travail expérimental est entamé sur des bétons où le ciment est substitué partiellement par des différents pourcentages de la poudre de marbre (5%,10%,15% et 20%), le présent mémoire de cette étude comporte cinq chapitres distincts.

Les principaux objectifs de ce travail sont :

- Production d'un béton autoplaçant économique de faible impact environnemental à travers l'exploitation des déchets de la marbrerie ;
- Étude de l'effet de la poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques, physicomécaniques;
- Valorisation des matériaux locaux dans la production des bétons autoplaçants.

3. PLAN DU TRAVAIL :

En plus de l'introduction générale, le mémoire comporte cinq chapitres. Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique, dans laquelle on traite les propriétés clés des BAP à l'état frais, puis on s'intéresse aux matériaux constituants et leurs effets sur la rhéologie, la résistance et la durabilité du BAP. Nous décrirons ensuite les principales méthodes de formulation du BAP existantes dans la littérature. Le chapitre est complété par l'étude de la rhéologie, les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du BAP.

Le deuxième chapitre est destiné aux essais destructifs et non destructifs pour la caractérisation mécaniques et en particulier les BAP.

Dans la partie expérimentale, on va s'occuper à la réalisation des essais relatifs à la caractérisation du mortier à l'état frais, et du béton à l'état frais et à l'état durci.

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

Chapitre IV : Techniques expérimentales

Chapitre V : Résultats et Discussion

Des recommandations seront données en fin de ce travail pour des futurs travaux envisagés.

Chapitre I

Notions générales sur le béton autoplaçant

I.1. Introduction

Les maîtres d'œuvres, architectes, ingénieurs, entreprises, fabricants de béton ont toujours recherché un béton permettant :

- ✓ une mise en place aisée,
- ✓ un bon remplissage des coffrages,
- ✓ un parfait enrobage des armatures.

La vibration a toujours été le moyen d'obtenir ces caractéristiques. Devant la complexité croissante des structures, formes variées, fortes concentrations d'armatures, les formulations de bétons ont dû s'adapter. Les bétons sont devenus de plus en plus fluides, malgré la réduction de la quantité d'eau de gâchage, à tel point que la vibration n'est devenue plus nécessaire. Cette hyperfluidité du béton a été rendue possible par l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants «superplastifiants ». Le béton autoplaçant était alors né ... Le JAPON a été dans les années 80 le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique et qui s'est progressivement répandue à travers le reste du monde, de nombreux termes définissent ces bétons:

- ✓ Béton auto-compactant (BAC).
- ✓ Self-compacting concrete (SCC, en Anglais).
- ✓ Béton hyperfluide.

L'appellation la plus usitée aujourd'hui est le béton autoplaçant (BAP).

I.2. DEFINITION

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.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les notions théoriques générales des différents concepts abordés dans ce mémoire.

Ce chapitre est divisé en deux parties :

- La première partie est : les généralités sur le béton autoplaçant.
- La deuxième partie est : Ajout et Adjuvant.

A. Généralité sur le béton autoplaçant:

I.3. 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 (superplastifiants). voir schéma suivant (figure I.1).

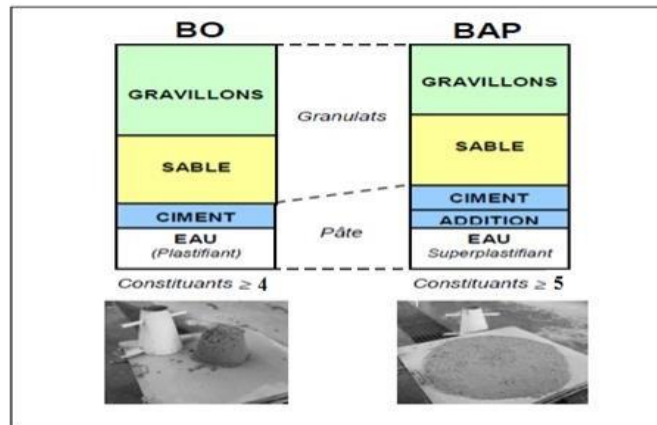


Figure I.1 Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [5].

I.3.1 Le ciment :

En principe tous les ciments conformes à la norme NF EN 197-1 conviennent pour la fabrication des BAP. Le choix correct du type de ciment est normalement imposé par les conditions spécifiques de chaque application.

I.3.2. 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.

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 auto plaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants [14].

Les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Les granulats roulés en vrac présentent un plus petit volume de vide intergranulaire,

ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique. Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm [3].

I.3.3. Eau :

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.), une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton, cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats [1]. A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton, l'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent [8].

I.3.4. Additions minérales :

Une addition minérale est définie par la norme européenne EN 206-1 comme étant, un Matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. D'après la norme précédente on a considéré deux types d'additions [9]:

- ❖ Le type I : additions quasiment inertes contiennent (fillers, pigments...etc).
- ❖ Le type II : additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent contiennent (cendre volante, poudre de marbre...etc).
- ❖ Avantages économiques et environnementaux [1] :
 - réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante.
 - réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO₂ dans la nature et réduire le coût du béton.
- ❖ Avantages techniques [1] :
 - 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.3.4.1. Différents types d'additions minérales :

I.3.4.1.1. Fillers (poudre de marbre) :

Le marbre est une roche métamorphique compacte commercialisée par l'entreprise nationale de marbre, Ain El Kabira Sétif. Extraite par abattage à l'exploitation, des moellons de dimensions variant de (80-100 cm), qui sont concassés, broyés pour obtenir une poudre finement broyée.



Figure I.2 Poudre du marbre utilisé.

I.3.4.1.2. Adjuvants (superplastifiants) :

L'action principale des superplastifiants est de flocculer les grains de ciment (Fig I.3) , 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 [1]. 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 [10].

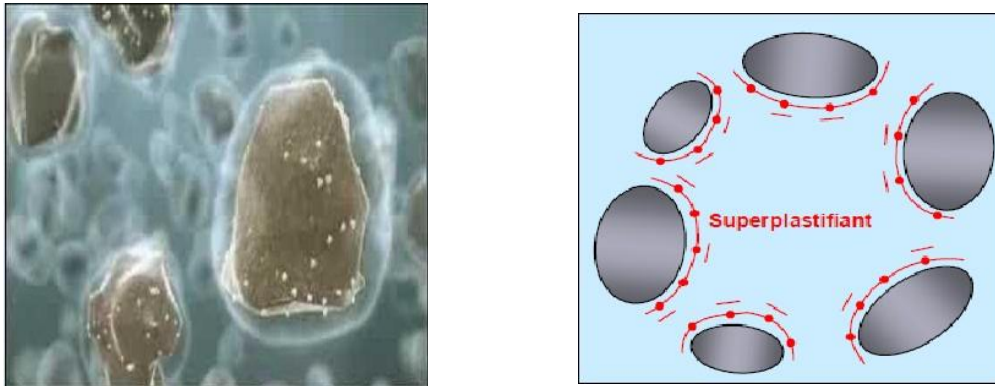


Fig.I.3: L'effet du superplastifiant sur les grains de ciment.

I.4. Formulation d'un béton autoplaçant :

Les méthodes de formulation sont différentes dans leurs approches, elles conduisent à une modification des proportions des constituants par rapport à un béton traditionnel vibré. Tout d'abord, le volume de gravier doit être réduit tout en utilisant des granulats aux dimensions limitées ($D = 20\text{mm}$). Cette limitation du volume et de la taille des plus gros grains est faite pour assurer une bonne lubrification du système avec un enrobage correct et suffisant des granulats par le mortier et ainsi éviter l'apparition des phénomènes de blocage. Il faut également noter ici l'importance de la forme des granulats, ainsi que de la granulométrie qui influent sur la compacité du squelette, pour assurer un bon écoulement du béton. Ensuite, pour lubrifier la structure et maintenir une homogénéité permettant à la fois un écoulement sur de grandes distances et éviter la ségrégation, le volume de pâte doit être optimisé en conséquence. Pour cela, l'utilisation des additions minérales est devenue incontournable. En effet, ces poudres apportent au béton un volume de fines important tout en limitant les effets négatifs d'une quantité trop importante de ciment. En effet un ajout d'eau trop important entrainerait une altération significative des propriétés à l'état durci du béton (résistance mécanique faible, porosité trop importante). Il est alors indispensable d'employer des superplastifiants qui permettent une meilleure dispersion des particules fines du ciment et des additions minérales [11].

I.4.1. Approches de formulation :

Les recherches entreprises recensées dans la littérature se basent essentiellement sur des approches diphasiques du matériau (**Fig I.4**). Elles se focalisent sur l'optimisation soit de la fraction fine, la pâte de ciment ou le mortier, soit du squelette granulaire. D'autres études vont plus loin en cherchant à associer deux phases optimisées. L'optimisation de la phase fine est généralement basée sur des critères d'écoulement (essais rhéologiques) permettant une optimisation des dosages des constituants respectifs (l'eau et des adjuvants). L'optimisation du squelette granulaire est réalisée de manière à atteindre le meilleur arrangement conduisant ainsi à la compacité maximale. Les deux phases sont ensuite associées de manière à produire un béton autoplaçants. Cette association peut être basée sur plusieurs critères [11] :

- ❖ La capacité de passage entre les armatures de la structure considérée qui fixent le volume critique de granulats associé ensuite avec un volume de pâte minimal pour permettre l'écoulement.
- ❖ Un volume de pâte minimal nécessaire pour remplir les vides entre les gravillons couplé avec une épaisseur minimale de pâte entourant ces mêmes gravillons pour permettre l'écoulement du béton.

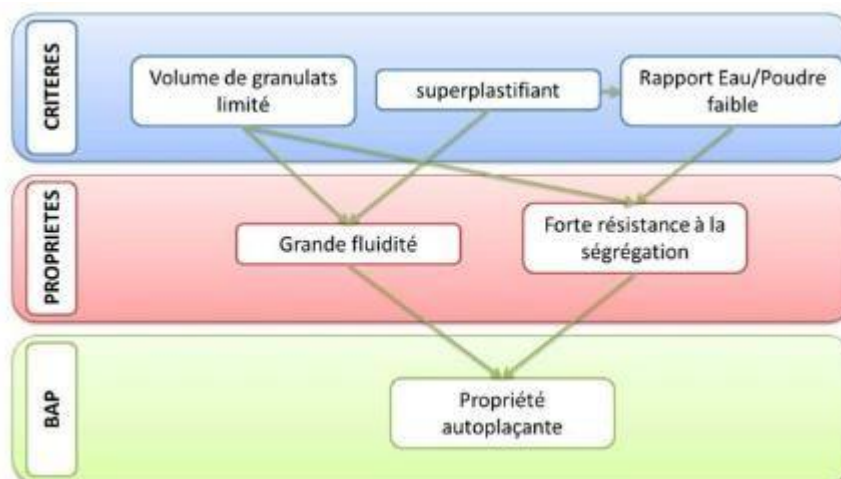


Fig.I.4: approche générale de formulation des BAP.

I.5. Caractérisation des bétons Autoplaçants :

I.5.1. Caractérisation des bétons Autoplaçants à l'état frais :

I.5.1.1. Essai d'étalement :

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 BA. 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 [3].

I.5.1.2. Essai de boîte en L:

Pour tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm. On mesure les hauteurs H et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 [3].

I.5.1.3. Essai de stabilité au tamis:

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplacants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto-nivelant 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. Cet essai consiste à l'utilisation d'un seau de 10L avec un couvercle, un tamis de 5 mm de diamètre de 315 mm plus fond et une bascule de portée minimale de 20 kg. A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans le seau. Après quinze minutes, un échantillon de 4,8 kg est versé du seau sur le tamis, deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation π la mesure de cet indice conduit à classer les formules de BAP de la façon suivante[5]:

- $0 \leq \pi \leq 15 \%$ stabilité satisfaisante.
- $15 \% < \pi \leq 30 \%$ stabilité critique, l'essai à refaire in situ.

- $\pi > 30 \%$ stabilité très mauvaise, béton inutilisable.

I.5.2. Caractérisation des bétons Autoplaçants à l'état durci :

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

I.5.2.1. Résistance mécanique :

Ce critère conduira au choix du ciment (nature, classe) et son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (gravier / sable). D'une façon expérimentale les BAP impliquent un rapport E/C bas, donc de nature à fournir de bonnes résistances mécaniques (Fig I.5) [3].

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 [1]. 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 [3].

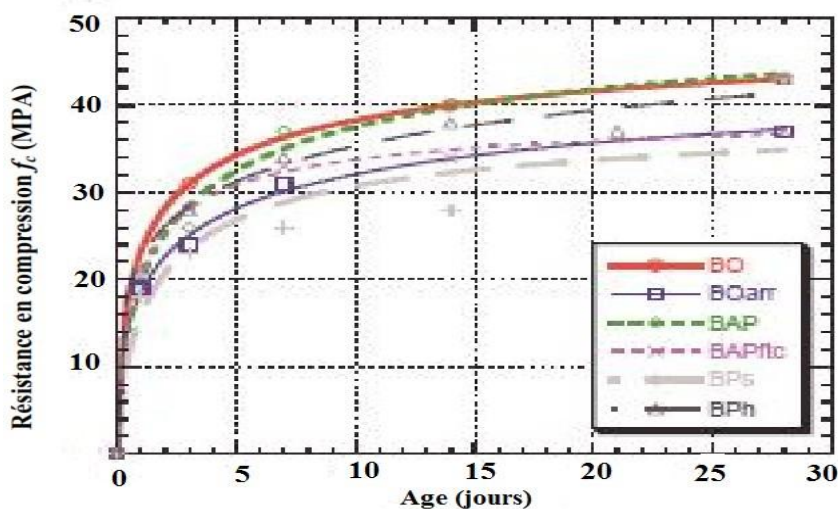


Fig I.5 : Résistance en compression d'un BAP par rapport des autres bétons.

I.5.2.2. Le module élastique :

Comme les BAP renferment un faible volume de granulats, il faut prévoir des modules d'élasticité plus faibles que pour des bétons de mêmes résistances mais de rhéologie conventionnelle. Ont montré que les modules d'élasticité sont moins élevés

pour les BAP, comparable ment au BHP, ce qui confirme cette idée a également trouvé que le module élastique d'un BAP est systématiquement inférieur à celui du BO dérivé. Mais la différence n'est pas très importante, puisqu'elle se situe entre 2 et 8% [3].

I.5.2.3. Retrait :

Les bétons vibrés ont un retrait endogène plus élevé que les BAP (les résultats donnent des valeurs entre 50 et 200 $\mu\text{m/m}$) (Figure I.6). Les BAP et les BO ont un retrait endogène semblable pour un même rapport E/C et l'addition minérale à un effet négligeable sur le retrait [12].

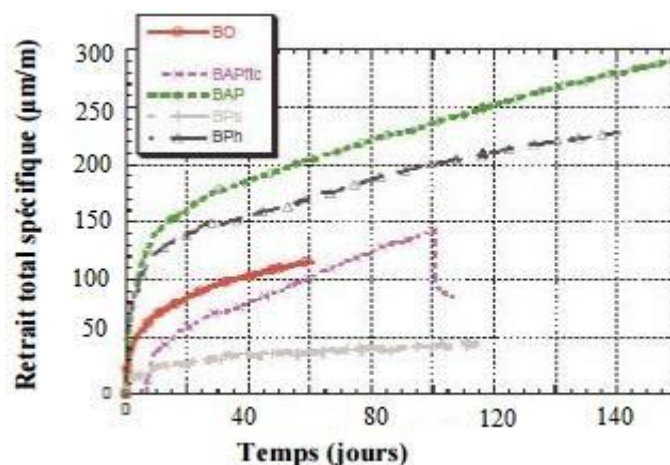


Figure I.6: Retrait spécifique des différents mélanges de bétons [12].

I.6. Propriétés physico-chimique et durabilité d'un BAP :

I.6.1. 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. (Zhu et al) 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. [12]

I.6.2. 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_2 , la température et l'humidité. Les premiers tests d'après [Sakata, 98]. Réalisés sur des

bétons ordinaires et des bétons autoplaçants montrent qu'il n'existe pas une différence importante entre leurs cinétiques de carbonatation [12].

I.7. Domaine d'application de BAP :

Le BAP constitue dans de nombreux domaines une alternative intéressante au béton ordinaire. Ces domaines comprennent le bâtiment, le génie civil, les dalles, les tunnels, la préfabrication et les travaux d'assainissement et de réhabilitation [2].

I.8. Avantages et inconvénients d'un béton autoplaçant :

I.8.1. Avantages [2] :

- Rendements améliorés et exécution plus rapide.
- Réduction des nuisances sonores durant l'exécution.
- Qualité accrue des surfaces de béton.
- Réduction/suppression des travaux de ragréage.
- Facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante.

I.8.2. Inconvénients :

- La raison essentielle qui ne favorise pas l'utilisation des BAP est due au fait que l'utilisation de superplastifiant et de fines étant nécessaire, ceci se traduit par une augmentation du coût [12].
- l'emploi des BAP pour la réalisation de grandes structures peut s'avérer économique dans la mesure où le coût supplémentaire engendré par les additions et les adjuvants est vite compensée par les gains réalisés sur la main d'œuvre et les délais d'exécution [12].

B. Adjoint et adjuvant

I.9. La poudre de marbre:

Le marbre est une roche calcaire de texture assez dense, à tissu compact ou cristallin. Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect. Ces couleurs proviennent essentiellement d'oxydes métalliques du fer, il est blanc si la roche dont il provient est uniquement composée de calcite.

Le marbre a été couramment utilisé comme matériau de construction depuis les

temps anciens. Par conséquent, les déchets de marbre en tant que sous-produits sont des matériaux très importants qui nécessitent un effort d'élimination environnemental adéquat. De plus, le recyclage des déchets sans gestion adéquate peut entraîner des problèmes environnementaux plus importants que les déchets eux-mêmes. La poudre de marbre est un déchet produit lors de la production de marbre. Une grande quantité de poudre est générée pendant le processus de coupe. Le résultat est qu'environ 25% de la masse de marbre d'origine est perdue sous la forme de poussière. Laisser ces déchets directement dans l'environnement peut causer des problèmes environnementaux tels que l'augmentation de l'alcalinité du sol, affecter les plantes, affecter le corps humain, etc. La poudre de marbre, un déchet solide généré par le traitement du marbre peut être utilisé comme matériau de remplissage dans le ciment ou les granulats fins lors de la préparation du béton. La poudre de marbre peut être utilisée comme adjuvant dans le béton, de sorte que la résistance du béton peut être augmentée.

La poudre de marbre qui ajoutés au ciment Portland peuvent en général accélérer l'hydratation du ciment avec comme conséquence, une amélioration des résistances à la compression à jeune âge.

Du point de vue chimique, la poudre de marbre n'a pas des propriétés pouzzolaniques, mais dans certains cas selon la nature du ciment, elle peut réagir avec les aluminates du ciment.

I.9.1. Effet de la poudre de marbre sur les qualités des ciments

Agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leur propriété physique sur certaines qualités du ciment :

- Diminution de perméabilité.
- Diminution de capillarité.
- Réduction des fissures.
- Augmente la cohésion.
- Accélérer l'hydratation du ciment

I.9.2. Effet de la poudre de marbre sur les propriétés physiques

La poudre de marbre incorporée dans un béton modifie le squelette granulaire du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie de volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliorant. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente, cet accroissement de la résistance est appelé effet de filler de la poudre de marbre [20].

I.9.3. Effet sur la porosité

Les fillers de la poudre de marbre auraient tendance à modifier la densité des C-S-H. En général la densité des C-S-H d'échantillons de pâtes contenant du CaCO₃ (corrigée en prenant en compte la présence de portlandite, de CaCO₃ et de C3S anhydre) est légèrement plus importante. Cependant cette relation dépend également du degré d'hydratation des matériaux. La densité d'une pâte de C3S incorporant du carbonate de calcium est par contre plus faible dans le cas de l'utilisation de CaCO₃ [21].

À un certain degré d'hydratation, une pâte de C3S ne contenant pas de CaCO₃ a une porosité totale plus faible. Cependant durant les sept premiers jours d'hydratation, une pâte contenant par exemple 15% de CaCO₃ peut posséder une porosité plus faible, due des degrés différents d'hydratation comparativement à une pâte du même âge sans CaCO₃, [22].

I.9.4. Réactivité indirecte de la poudre de marbre

L'addition de CaCO₃ augmente le taux d'hydratation du silicate tricalcique. Cet effet serait d'autant plus important que la finesse des particules ajoutées diminuerait et que la quantité de carbonate de calcium ajoutée serait accrue. Le carbonate de calcium accélérerait l'hydratation du silicate tricalcique comme le dichlorure de calcium mais sans toutefois diminuer la période d'induction. L'effet accélérateur est particulièrement marqué pour une teneur optimale en CaCO₃. Après cet optimum, il pourrait bloquer la dissolution et la cristallisation de produits d'hydratation. Cela pourrait provenir du fait que des particules de CaCO₃ seraient incorporées dans la phase des C-S-H. Plus la quantité de CaCO₃ incorporée serait grande, plus cette partie prise par les C-S-H serait importante, du moins jusqu'à une valeur de 25% [20].

I.9.5. Réactivité directe de la poudre de marbre

Longuet, et al ont introduit la notion de filler inerte ou actif. Ils ont proposé d'étudier la réactivité avec le C3A comme évaluation de la réactivité hydraulique de la poudre de marbre donné. En effet, il a été démontré que le CaCO₃ peut réagir avec le clinker. Des analyses de diffraction aux rayons (X) a permis de détecter la présence de carbo-aluminates de calcium hydratés dans des pâtes de ciment. Ces produits pourraient se former en présence ou non de gypse dans le mélange. La formation de carbo-aluminates de calcium hydraté est vue comme analogue à celle de l'ettringite. Il y a composition entre SO₄ et CO₃ pour réagir avec les aluminates de calcium. La participation directe du carbonate de calcium (introduit par le biais de l'addition de fillers calcaires) à la réaction avec hydraté de formule C3A. CaCo₃.11H₂O. La forme C3A.3CaCO₃.27H₂O aurait été identifiée dans un mélange cimentaire avec CaCO₃ [20].

I.9.6. Effet de la poudre de marbre sur les aspects rhéologiques:

La présence de la poudre de marbre implique des variations du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique. L'effet s'oriente vers un effet fluidifiant.

I.10. Le MEDAFLOW 30

Dans notre sujet de recherche, nous avons utilisé un type des adjuvants super plastifiants qui appelé « **MEDAFLOW 30** » fabriqués par la société Granitex à Oued Smar-BP 85-16270 Alger [15].

I.10.1. Description :

« MEDAFLOW 30 » est le superplastifiant de troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates à base d'éther pour améliorer significativement propriétés concrètes. Et du béton et du mortier de très haute qualité peuvent être obtenus[15].

Tableau I.1 : 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%

I.10.2. Domaines d'application :

- ✓ Les bétons de préfabrication.
- ✓ Les bétons prêts à l'emploi.
- ✓ Les bétons lourds et légers.
- ✓ Les bétons d'ouvrages d'art.
- ✓ Les bétons de dallages industriels.
- ✓ Les bétons de bâtiment.
- ✓ Les bétons précontraints.
- ✓ Les bétons pompés.
- ✓ Les bétons pour fondations profondes.
- ✓ Les bétons pour ouvrages fortement ferrillés.

- ✓ Les bétons soumis à des milieux agressifs.
- ✓ Les BHP, BTHP, BUHP et BFUP
- ✓ Les bétons autonivelants - bétons autoplaçants.
- ✓ Les bétons architectoniques.

I.10.3. Propriétés :

Tableau I.2 : Propriétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci. [15]

« 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 oeuvre	Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Tableau I.3: Résistance à la compression obtenue par le « MEDAFLOW 30 » [15].

Désignation	Rc en (MPa)		
	3J	7J	38J
MEDAFLOW 30 (1.4 %)	39.2	54.7	62.2

I.10.4. Dosage et mode d'emploi :

On utilisé entre **0.5%** à **2%** du poids de ciment soit **0.46** à **1.85L** pour **100Kg** de ciment. Ce type d'adjuvant introduit dans l'eau de gâchage, il est recommandé d'ajouter dans le béton après que **50** à **70%** de l'eau de gâchage ait déjà été introduite[15].

C. Conclusion :

La première partie présente un aperçu détaillé sur le béton autoplaçants en tant que nouveau matériau.

Il 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 me donne les avantages apportés par les BAP.

Et la deuxième partie contient des notions générales sur poudre de marbre et l'adjuvant « MEDAFLOW 30 » leur influence sur les bétons spécialement le BAP.

Chapitre II

Généralités sur les essais destructifs et non destructifs

Chapitre II : Généralités sur 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.

On définit les essais destructif, ceux basé sur la détérioration des matériaux contrôlé pour détermine les performances souhaité et les propriétés aussi.

On définit les essais non-destructif, s'il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions sans modification ni sa performance ni son apparence. Une importantcaractéristique de ce type des essais est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre leschangements des propriétés du béton dans le temps.

II.2. Les méthodes d'essai destructif sur le béton :

II.2.1. Essai de compression :

La caractérisation du comportement en compression est effectuée conformément à la norme [NF EN 12390-3], sur des éprouvettes cubiques de dimensions (10x10x10cm²) et (15 x 15 x 15 cm³) respectivement (Figure III.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 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 [23].



Figure II.1 : Dispositif pour mesurer la résistance à la compression.

II.2.2. Essais de traction par flexion :

Effectuer sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (7 x 7 x 28 cm³) (**Figure II.2**) mûries à l'eau, conformément à la norme [NF EN 12390-5]. La résistance à la traction **R_t** obtenue à 28 jours. L'appareil utilisé est une presse hydraulique de flexion dont la capacité maximale est de 150kN en cisaillement. L'expression des résultats pour exprimer la contrainte sera donnée par la relation **R_t=1.8F/(axa)** en MPa [23].



Figure II.2 : Dispositif pour mesurer la résistance à la traction par flexion.

II.3. Les méthodes d’essais non-destructifs sur le béton :

II.3.1. Essai au scléromètre :

C’est la méthode de dureté superficielle consiste essentiellement à une auscultation du béton par une manière standard(Figure II.3), en utilisant une masse donnée activée par une certaine énergie puis mesurer ensuite le rebondissement [24].



Fig II.3 : L’appareil de scléromètre [24].

II.3.1.1. Principe de scléromètre [NF EN 12504-2] :

Le principe de base de l’essai au scléromètre est que le rebond d’une masse élastique dépend de la dureté de la surface sur laquelle frappe la masse Comme la (Figure II.4).

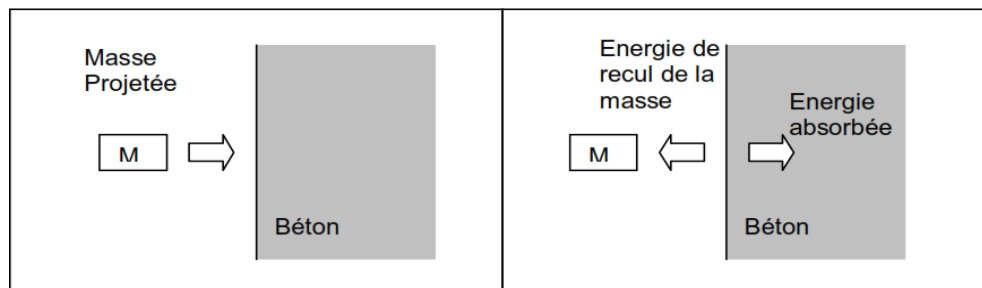


Figure II.4: Principe du Scléromètre.

Dans l’essai au scléromètre une masse approximative de **1.8 kg** montée sur un ressort a une quantité potentielle fixe d’énergie qui lui est transmise par un ressort tendu a partir d’une position fixe, ce que l’on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l’essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête et la distance qu’elle parcourt, exprimée en pourcentage de l’extension initiale du ressort est appelée l’indice de rebondissement. En utilisant ce méthode sur les éléments suivant[24] :

- ❖ Dans le choix des zones d’essai, éviter la surface de coulée, faire l’essai sur les surfaces parfaitement planes et lisses (sans rugosités).

- ❖ Dans le choix des points d'essai, éviter les régions proches des arrêtes de l'élément, la distance entre les points d'essai doit être d'au moins **2cm**.
- ❖ L'indice de rebondissement doit être déterminé en plusieurs points rapprochés (en général de 6 à 12) pour une pièce bien déterminé.

II.3.1.2. Les étapes pour tester le scléromètre :

- Après avoir déterminé l'indice de rebondissement en plusieurs points on calcul les indicemoyens.
- Procéder à une correction d'étalonnage.
- Faire une correction à la position de scléromètre.

Correction de l'humidité du béton pour la valeur du l'indice sclérométrique(**Figure II.5**) [24]:

- ❖ Béton humide **1.10**.
- ❖ Béton normal **1.00**.
- ❖ Béton sec **0.95**.

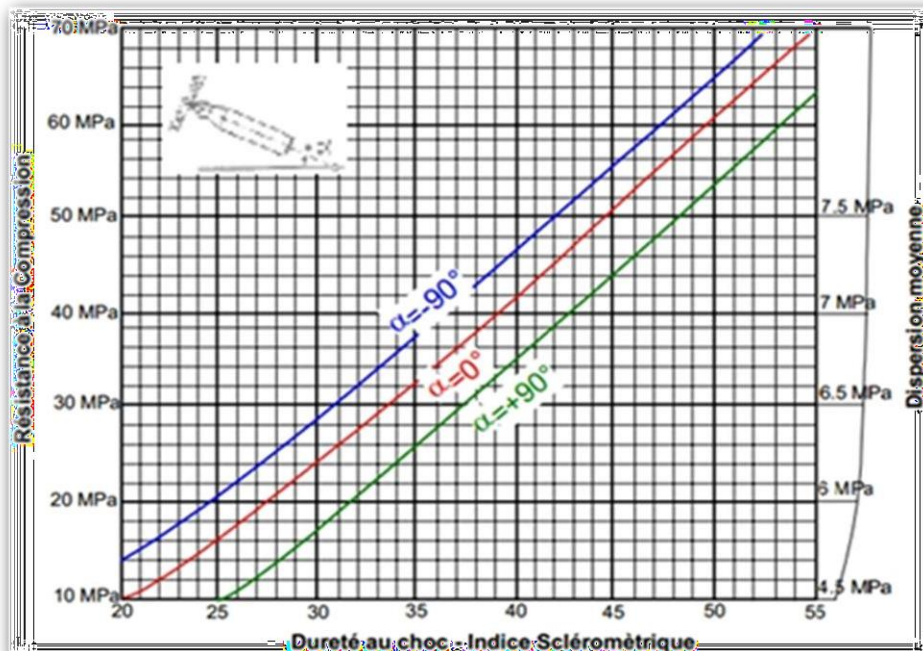


Fig II.5 : La résistance probable du béton en fonction de la mesure du recul (linéaire ou angulaire).

II.3.1.3. Les avantages de l'essai sclérométrique [24] :

- ❖ C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide.
- ❖ L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués. Et vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge.
- ❖ Une application particulière de l'essai consiste à évaluer la résistance à l'abrasion des planchers de béton, qui dépend largement de la dureté de surface.

II.3.1.4. Les inconvénients de l'essai sclérométrique [24] :

- ❖ Une précision entre ± 15 et $\pm 20\%$ n'est possible qu'avec des éprouvettes qui ont été coulées et soumises à un traitement de cure.
- ❖ Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette.
- ❖ La résistance obtenue n'est que celle de la peau de béton, elle ne renseigne pas sur le béton à l'intérieur de la masse de l'ouvrage.

II.3.1.6. Mesures sur éprouvettes :

Les éprouvettes doivent être de forme cylindrique ou cubique (**Fig II.6**), ils doivent être maintenus entre les plateaux d'une presse hydraulique, sous une contrainte de **0,5 MPa**. Il est relevé **27** mesures réparties sur trois génératrices en **27** points distincts et distante entre eux de **30 mm**, d'où aucune mesure ne doit être située à moins de **40 mm** des faces planes de l'éprouvette. Dans tous les cas de conservation, les mesures au scléromètre ne peuvent être effectuées qu'après un délai d'au moins **48 h** [**19**].



Figure II.6: a) Mesure sur surface béton, b) sur éprouvette cubique (10*10*10) cm³ [19].

II.3.1.6. Exploitation des résultats :

Des études ont montré que la formule en question peut prendre la forme :

$$R_c = a (I_s)^2 + b (I_s) + c$$

Avec :

a, b et **c** : des coefficients dépendant de la nature des granulats,

Des granulats siliceux de qualité courante ($D_{\max} = 16$ mm) et pour

un béton de résistance inférieure à 30 MPa, on peut considérer d'après

F. Gabryszak [19] :

$$R_c = \frac{1}{37} \cdot (I_s)^2 - 0.3 (I_s)$$

II.3.2. Essai d'auscultation dynamique :

Connu depuis longtemps cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton (**Figure II.7**) [24].



Fig II.7 : Appareil d'auscultation sonore.

II.3.2.2. Principe d'auscultation dynamique [NF EN 12504-4] :

La méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, à parcourir une distance connue. Les principales caractéristiques de tous les appareils

comprennent un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions. La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre **10** et **150 HZ**. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures [24] :

- ❖ Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air.
- ❖ La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs.
- ❖ Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre **5** et **30°C**, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température.

II.3.2.2. Détermination de la vitesse de propagation des ondes :

Liée essentiellement à la masse volumique et le coefficient dynamique du béton. On définit par l'équation suivante :

$$v^2 = \frac{E_d \cdot (1 - \nu)}{\rho(1 + \nu) \cdot \nu}$$

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tel que l'âge du béton, les conditions d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures [24].

Tableau.II.1: Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions selon Leslie.

Qualité	Très Excellente mauvaise	Bonne	Douteuse	Mauvaise	
Vitesse de propagation m/s	Supérieure à 4000	3200- 4000	2500- 3200	1700- 2500	Inférieure à 1700

II.3.2.4. Manières de mesure :

II.3.2.3.1. Mesures En Transparence (Directe) :

Sont utilisées dans le cas des éprouvettes, poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester [24].

II.3.2.3.2. Mesures en surface (indirecte) :

Utilisées sur les dalles et éléments en longueur, l'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance. Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant [24].

II.3.2.3.3. Mesures semi directe :

Utilisées particulièrement sur les éléments de structure ou on ne peut pas utiliser les deux autres manières [24].

II.3.2.4. Les avantages d'essai d'auscultation dynamique [24] :

- C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton.
- La mesure des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton.
- L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel/dégel.

II.3.2.5. Les inconvénients d'essai d'auscultation dynamique :

- Ces essais ne sont toute fois pas aussi efficaces pour évaluer la résistance à cause du grand nombre de variables influençant la relation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions.
- La précision des résultats est fonction de la précision de l'étalonnage et de l'uniformité de la composition du béton de l'ouvrage [24].

II.4. Méthodes combinées :

La méthode combinée permet une appréciation de la résistance de béton in situ en relation avec l'indice sclérométrique et la vitesse de son. Indépendamment du type d'essai utilisé, les données proportionnées et fiables de corrélation avec des données standard de la résistance à la compression en **28j**. Cette solution est

particulièrement avantageuse lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires. Par exemple, lorsqu'une augmentation du taux d'humidité augmente la vitesse de son, mais diminue l'indice de rebondissement enregistré [24].

II.4.2. Principe :

Déterminer la résistance en compression du béton à partir des abaques donnant (Fig II.8) la variation de la résistance du béton en fonction de la vitesse des ultrasons et de l'indice de rebondissement [$R(V, N)$]. Cette résistance est corrigée par des valeurs des coefficients d'influences des différents constituants et de leur nature [24].

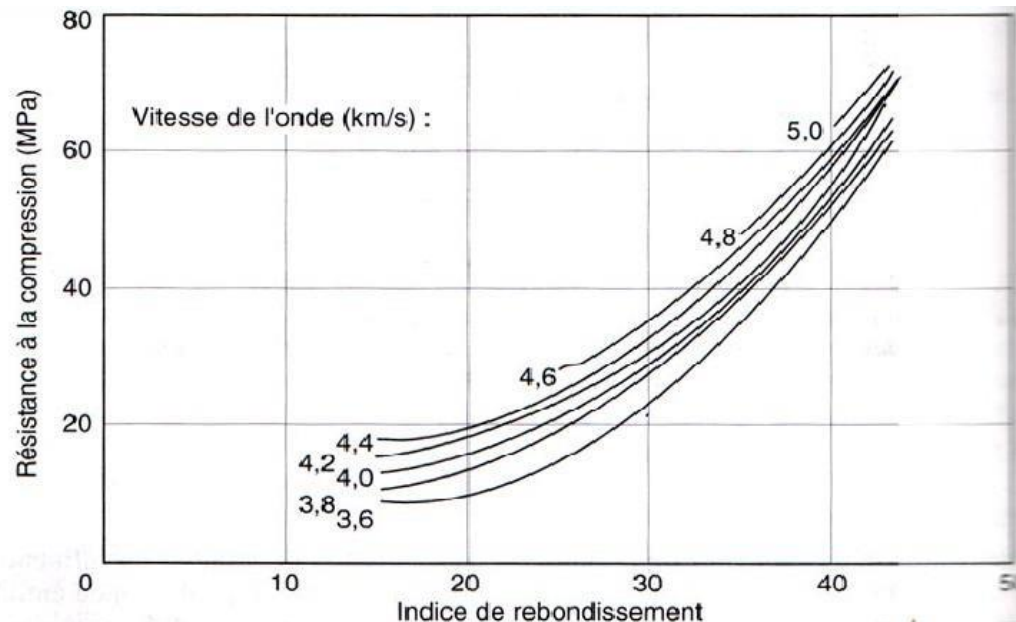


Fig II.8: Courbe d'estimation de la résistance in situ par utilisation conjointe de la mesure de propagation d'ondes ultrasoniques et les résultats sclérométrique selon [Bellander, 1977] [19].

La méthode a été développée pour essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton. La relation générale entre la résistance et l'indice sclérométrique est de la forme [19] :

$$R_c = \left(\frac{I_s}{3.64 + 0.0235 * I_s + 0.56 * v} \right)^2$$

II.4.2. Les avantages des méthodes combinées :

- L'utilisation combinée d'essais non destructifs garantit au résultat final obtenu une précision supérieure. Elle permet d'annuler des effets parasites.

- Cette technique est utilisée afin d'essayer d'augmenter la fiabilité des essais nondestructifs en détectant la résistance du béton [24].

II.4.3. Les inconvénients des méthodes combinées :

- La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions.
- Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considérée, dans la pratique [24].

II.5. 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.

Chapitre III

Caractérisation des matériaux utilisés

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous avons décrits les caractéristiques essentielles de chaque composant avec une description détaillée des modes opératoire pour chaque essai. Ces essais sont réalisés au niveau du laboratoire de genie civil à l'université Mohamed Boudiaf à M'sila. la composition d'un béton autoplaçant tel que : (granulats, ciment, poudre marbre, adjuvants et eau).

III.2. Matériaux utilisés :

Ciment de type (NA 442 - CEM I 42,5 N-SR 3) provenant de la cimenterie LAFARGE à M'sila.

Le sable à l'origine siliceux provenant de Oued Maiter de Boussaâda, M'sila.

Deux fractions de gravier concassé (3/8, 8/16) d'origine calcaire de la région de BBA.

L'ajout: Poudre de Marbre PM de fraction < à 0,08mm

L'adjuvant: « MEDAFFLOW 30 », un superplastifiant provenant la société de Granitex Oued-Smar à Alger.

L'eau de gâchage et conservation : eau potable de robinet du laboratoire de génie civil.

III.3. Caractéristiques des matériaux utilisés :

III.3.1. Caractéristiques du ciment utilisé :

Le ciment Portland utilisé est un, CEM I (ciment résistance aux sulfates) de classe 42.5 provient de la cimenterie LAFARGE à M'sila. Mokaouem (CEM I 42,5 N-SR 3) pour béton de haute performance et qualité destiné à la construction des ouvrages dans un milieu agressif, exemple : « béton structurel, Les travaux maritimes, Les travaux hydrauliques » [17].

Caractéristiques est établie par le laboratoire de la cimenterie Lafarge de M'sila

III.3.1.1. Caractéristique physique :

Tableau III.1 Caractéristiques physiques du ciment utilisé[17].

Propriétés physiques	Valeur
Consistance normale%	25 à 28
Finesse suivant la method de Blaine(cm ² /g)(NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours µm/m	< 1000
Expansion (mm)	≤2,0
Chaleur d'hydratation	<270j/g

III.3.1.2. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé :

Tableau III.2 : Les compositions chimiques [17].

Analyses chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA55042)	0,5 à 3 %
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en Chlorures (NS5042) (%)	0,01 à 0,05

III.3.1.3. Les caractéristiques minéralogiques :

Tableau III.3 : Les compositions minéralogiques [17].

Composition minéralogique	Valeur
Taux d'aluminate C3A	<3.0%

III.3.2. Caractéristiques du sable utilisé :

III.3.2.1. Caractéristique chimique du sable :

La composition chimique de (Oued Maiter) est établie en mars 2009, à la cimenterie Lafarge (M'sila). Elle est donnée au (**Tableau III.4**).

Tableau III.4 : Les Caractéristiques chimiques du sable.

Éléments	Symboles	Teneur en (%)
Silice	SiO ₂	86.95
Chaux	CaO	6.33
Oxyde de ferrique	Fe ₂ O ₃	0.90
Alumine	Al ₂ O ₃	1.92
Oxyde de magnésium	MgO	0.53
Pente de fer	P.A.F	2.81
Sulfate	SO ₃	0.44

III.3.2.2. Essai d'analyse granulométrique [NF EN 933-1] :

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage c'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant l'échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.



Figure III.1: Appareil de l'analyse granulométrique

Selon la norme indiquée, les résultats obtenus sont représentés dans le (Tableau III.5) suivant :
que $M = 2\text{kg}$

Tableau III.5. Analyse granulométrique du sable (sable de Boussaâda)

Tamis (mm)	Poids des Tamis vide (g)	Poids des tamis+sable (g)	Refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
5	855	855	0	0	0	100
2.5	753	838	85	85	4.25	95.75
1.25	653	726	73	158	7.9	92.1
0.63	621	706	85	243	12.15	87.85
0.315	561	1135	574	817	40.85	59.15
0.125	518	1588	1070	1887	94.35	5.65
0.08	506	610	104	1991	99.55	0.45
fond	564	572	8	1999	99.95	0.05

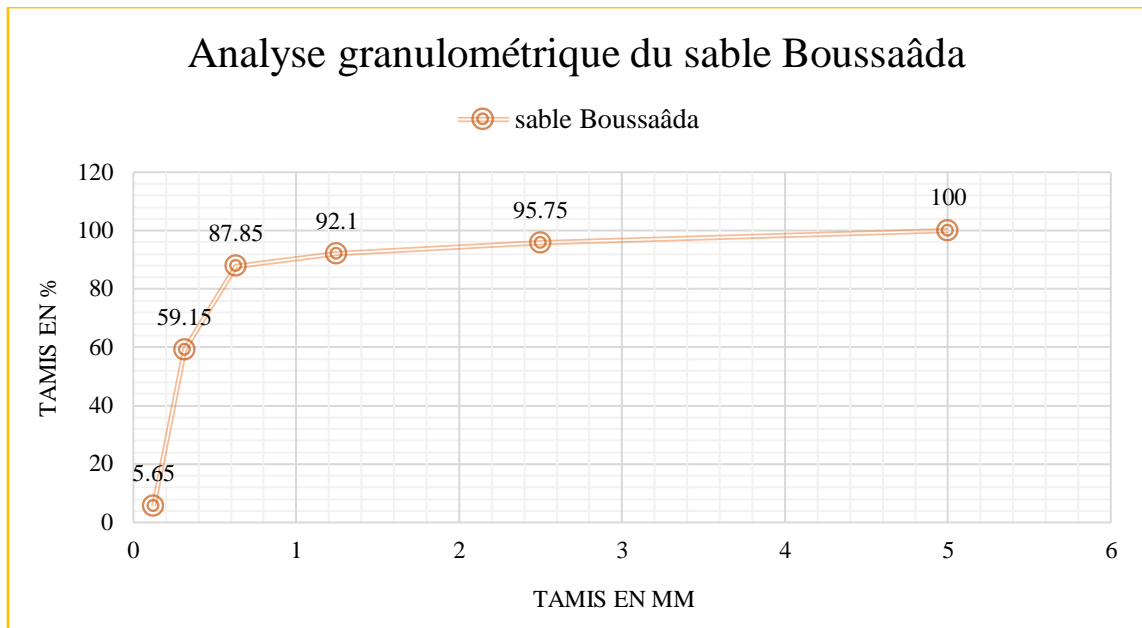


Figure III.2 : La courbe granulométrique du sable de Boussaâda.

a) Module de finesse [NF EN 12620] :

Le caractère plus ou moins d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse Mf celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité pour les tamis d'ouverture (0.16 / 0.315 / 0.63 / 1.25 / 2.5 / 5 mm) sur 100 ce paramètre est en particulier utilisé dans les calculs de compositions des bétons.

$$Mf = \sum Rc / 100$$

Rc : Refus cumulé.

Les normes soviétiques spécifient le Mf des sables comme suit :

- Sable gros $Mf > 2.5$
- Sable fin $1.5 < Mf < 2$
- Sable moyen $2 < Mf < 2.5$
- Sable très fin $1 < Mf < 1.5$

Pour le sable de Boussaâda : $Mf = 1.6$; $1.5 < Mf < 2$ ➡ C'est un sable fin.

III.3.2.2. Caractéristiques physiques du sable utilisé :

a) Masse volumique absolue [NF EN 1097-7]:

Mode opératoire :

On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité 1000 ml. On prend 03 échantillons de masse 300g.

On place l'échantillon dans le récipient de capacité **1000** ml et on y verse **300** ml d'eau préparé préalablement dans **2ème** récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable – eau. Soit (V) ce volume. Sachant que le volume (V_e) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul.

Volume de sable : $V_1 = V - 300$ (ml).

Calculée par la formule : $\rho_s = M/V_1$, $M=300g$. Les résultats obtenus en (Tableau III.3) :

Tableau III.6. Masse volumique absolue du sable de Boussaâda.

N0 d'essai	Masse utilisée M (g)	Volume utilisée V_e (ml)	V2 (ml)	ρ (g/ml)	ρ_{moy} (g/ml)
1	300	300	420	2.5	2.55
2	300	300	418	2.542	
3	300	300	415	2.608	

b) Masse volumique apparente [NF EN 1097-6] :

Mode opératoire :

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité **2 à 2,5** litres.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide M_1 .
- On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.
- Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout. Soit M_2 ce poids.
- Volume de récipient $V = 900 \text{ cm}^3$.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

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

Tableau III.7. La masse volumique apparente du sable de Boussaâda.

Essais	Vr	M1(g)	M2(g)	γ_{app} (g/cm3)	γ_{moy} (g/cm3)
1	900	116	1459	1.493	1.493
2		116	1460	1.493	
3		116	1471	1.503	

a) Porosité :

C'est le volume des vides entre les grains du sable où le rapport du volume des vides au volume total du sable. On calcul la porosité selon la formule suivante :

$$P = \left[1 - \left(\frac{\gamma_{app}}{\rho} \right) \right] . 100$$

$$P (\%) = 100 - (\text{Masse volumique apparente} / \text{masse volumique absolue}) \times 100$$

Pour le sable du dune :

- P = **41.45 %**

c) Compacité :

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est-à-dire le rapport du volume absolue des grains au volume apparent du matériau.

La compacité donnée par la formule :

$$C = \rho_{app} / \rho_{abs} = 1 - P$$

Pour le sable du dune :

- C = **58.55%**

d) L'indice des vides:

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide.

$$e = V_v/V_s = P / (100 - P).$$

Avec **P** en pourcent (%).

- Pour le sable du dune :
e = 0.70 %

Les résultats de la porosité, la compacité et l'indice de vide sont regroupés dans le Tableau suivant :

Tableau III.8: la porosité ; la compacité et l'indice des vides pour le sable de Boussaâda.

La Porosité P %	La compacité C %	Indice des vides e %
41.45	58.55	0.70

e) Equivalent de sable [NF EN 933-8] :

- **Equivalent de sable visuel : (E.S.V) :**

Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h1 du niveau supérieur du floculant jusqu'au le fond de l'éprouvette à l'aide d'une règlette.

Mesurer également avec le réglet la hauteur h2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

On: h2 h1

E.S.V = (h2 / h1)*100 (%) h2 : la hauteur du sable.

- **Equivalent de sable piston : (E.S.P)**

Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, cet instant bloquer le manchon du piston, et sortir celui-ci de l'éprouvette.

Introduire la règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que de zéro vienne buter contre la face intérieur de la tête du piston, soit h2' la hauteur lue et correspondant à la hauteur de le partie sédimentée.

$$E.S.P = (h2'/h1)*100(\%)$$

On : h_1 : la hauteur du sable +floculat.

h_2' : la hauteur du sable ($h_2' < h_1$).

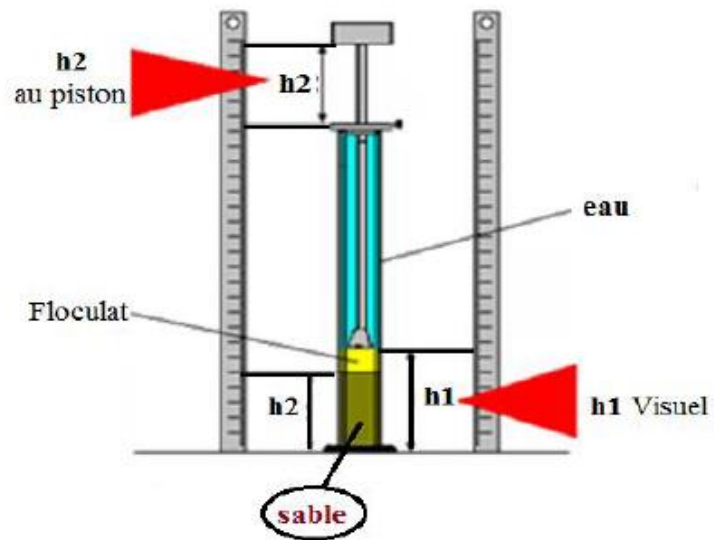


Figure III.3 : Principe de l'équivalent de sable.

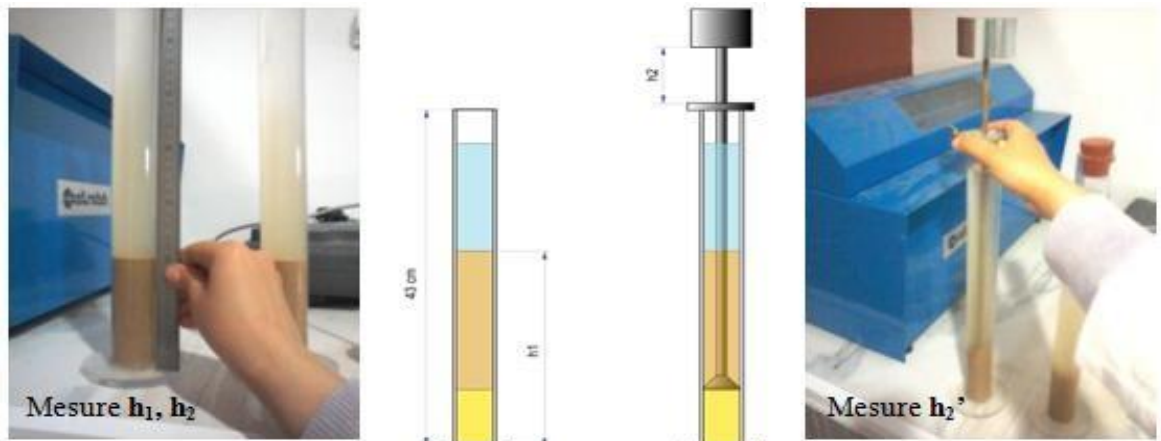


Figure III.4 : Essai équivalent de sable exécuté au laboratoire.

Tableau III.9: La classification de la nature sable en fonction d'équivalent de sable (E.S).

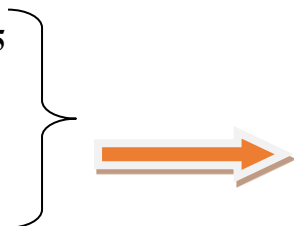
E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
E.S < 65	E.S < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
65 < E.S < 75	65 < E.S < 70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le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

Tableau III.10: Les résultats d'équivalent du sable de Boussaâda.

Essai	h1	h2 (cm)	E.S.V%	E.S.Vmoy	H'2(cm)	E.S.P %	E.S.Pmoy
1	12.3	8.5	69.10	68.33	9.3	75.60	74.05
2	13.4	8.4	62.68		9	67.16	
3	11.2	8.5	75.89		8.55	69.64	

Donc :

E.S.V > 85
risque



Sable très propre : l'absence totale de fine argileux

D'entraîne d'un défaut de plasticité du béton qu'il Faudra rattraper par augmentation du dosage en

eau

E.S.P > 80

f) Teneur en eau [NF P 18-555] :

Les résultats obtenus en (Tableau III.11). que : $W = [(M_h - M_s) / M_s] * 100$ (%)

Tableau III.11 : Teneur en eau de sable utilisé.

Essais	M _h (g)	M _s (g)	W(%)	W _{moy} (%)
1	300	298.2	0.60	0.53
2	300	298	0.67	
3	300	299	0.33	

III.3.3 Caractéristique du gravier utilisé :

Dans cette partie, nous étudions les propriétés du gravier utilisé dans notre étude

III.3.3.1 Origine du gravier utilisé :

Le gravier primaire utilisé pour fabriquer le béton est extrait en concassant des roches a partir d'une carrière située à **25 km** de MSILA vers **B.B.A**

Les fractions du gravier sont :

- ✓ Fraction **3/8**.
- ✓ Fraction **8/16**.

III.3.3.2 Caractéristiques physiques du gravier utilisé:

a) Masse volumique apparente [NF P 18-554] :

Mode opératoire :

- Séchez le matériau jusqu'à un poids constant.
- Pesez le récipient vide (M1).
- Placez le récipient sur la table et remplissez-le de gravier à l'aide d'une pelle Une saillie qui affleure la surface du récipient. distance d'un conteneur à l'autre La pelle doit mesurer environ 10 cm.
- Pesez à nouveau le récipient rempli de gravier. Soit M2 ce poids. La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma = \frac{(M2 - M1)}{V}$$

Où :

- V: Volume du récipient.
- M1: Le poids du récipient à l'état vide.
- M2: Le poids du récipient plein de gravier.

Tableau III.12: Masse volumique apparente du gravier.

Graviers	Essai	M1 (Kg)	M2 (Kg)	γ app (kg/l)	γ app moyen (kg/l)
3/8 V=7L	1	2.924	10.068	1.020	1,011
	2		9.978	1.007	
	3		9.980	1.008	
8/16 V=10L	1	3.496	14.596	1.110	1,104
	2		14.564	1.106	
	3		14.470	1.097	

b) Masse volumique absolue :

Mode opératoire :

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.

Graviers	Essai	M1 (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ abs (g/ml)	ρ abs moyen (g/ml)
3/8	1	400	400	560	2.5	2.583
	2	400	400	550	2.67	
	3	400	400	555	2.58	
8/16	1	400	400	560	2.5	2.560
	2	400	400	550	2.67	
	3	400	400	560	2.5	

c) Compacité, porosité et l'indice de vide [NF EN 1097-4] :

On calcule les paramètres (Tableau III.14) et les même formules que le sable.

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

Fraction du gravier	Porosité P(%)	Compacité C(%)	L'indice des vides (e)
3/8	60.86	39.14	1.55
8/16	56.88	43.12	1.31

III.3.3.3 Analyse granulométrique :

Le même essai d'analyse granulométrique de sable :

- Fraction 3/8 $M_{G3/8} = 1.6 \text{ kg}$

Tableau III.15 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tamis (mm)	Poids des Tamis vide (g)	Poids des tamis+sable (g)	Refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
8	654.2	667.2	13	13	0.8125	99.187
6.3	638.8	897.3	258.5	271.5	16.968	83.032
5	624	1273.1	649.1	920.6	57.537	42.463
4	603.6	1054.4	450.8	1371.4	85.7125	14.287
3.15	610.9	784	173.1	1544.5	96.531	3.469
2.5	603.1	639.2	36.1	1580.6	98.787	1.213
fond	453.9	475.4	21.5	1600	100	0

- Fraction 8/16 $M_{G8/16} = 3.2 \text{ kg}$

Tamis (mm)	Poids des Tamis vide (g)	Poids des tamis+sable (g)	Refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
20	0	0	0	0	0	100
16	930	1050	120	120	3.75	96.25

12.5	891	1841	950	1070	33.4375	66.5625
10	957	2293	1336	2406	75.1875	24.8125
8	825	1494	669	3075	96.09375	3.90625
6.3	567	692	125	3200	100	0

Tableau III.16: Analyse granulométrique du gravier 8/16.

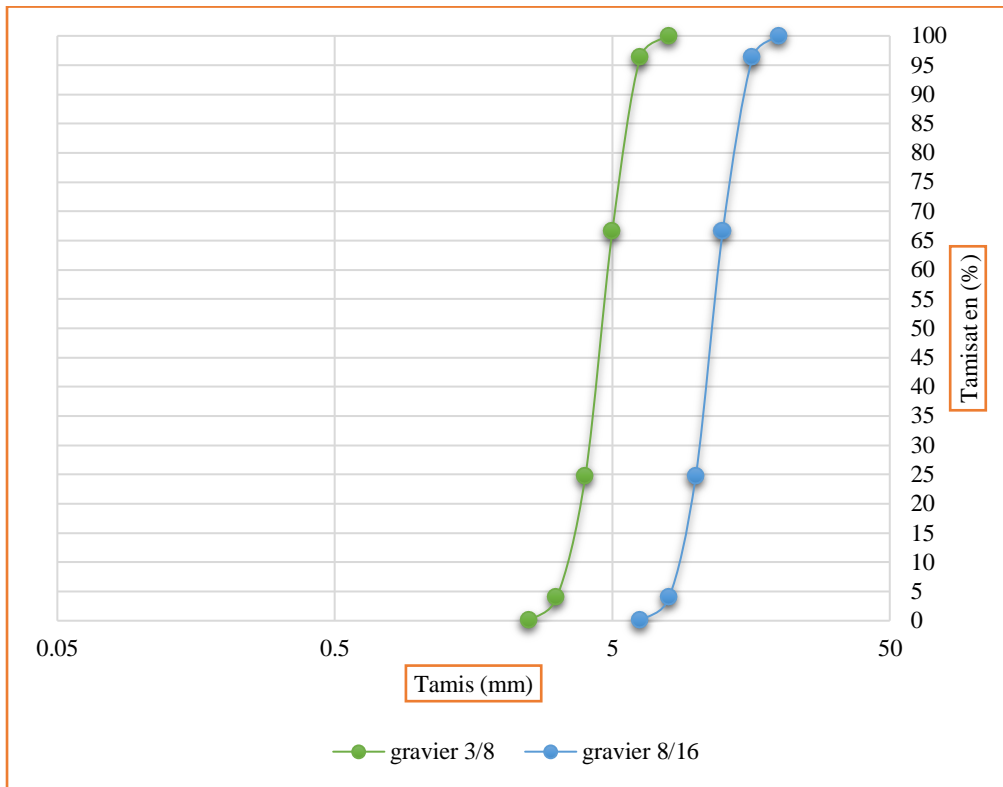


Figure III.5 : Courbe analyse granulométrique d'un gravier de deux fraction (3/8, 8/16).

III.4 Les Adjuvants :

III.4.1 Description :

« MEDAFLOW 30 » est le superplastifiant de troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates à base d'éther pour améliorer significativement propriétés concrètes. Et du béton et du mortier de très haute qualité peuvent être obtenus.

Tableau III.17 : 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.4.2 Domaines d’application :

- Les bétons de préfabrication.
- Les bétons prêts à l’emploi.
- Les bétons lourds et légers.
- Les bétons d’ouvrages d’art.
- Les bétons de dallages industriels.
- Les bétons de bâtiment.
- Les bétons précontraints.
- Les bétons pompés.
- Les bétons pour fondations profondes.
- Les bétons pour ouvrages fortement ferrailés.
- Les bétons soumis à des milieux agressifs.
- Les BHP, BTHP, BUHP et BFUP
- Les bétons autonivelants - bétons autoplaçants.
- Les bétons architectoniques.

III.4.3 Propriétés :

Tableau III.18 : 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 oeuvre	Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Tableau III.19: Résistance à la compression obtenue par le « MEDAFLOW 30 ».

Désignation	Rc en (MPa)		
	3J	7J	38J
MEDAFLOW 30 (1.4 %)	39.2	54.7	62.2

III.4.4 Dosage et mode d'emploi :

On utilise entre **0.5%** à **2%** du poids de ciment soit **0.46** à **1.85L** pour **100Kg** de ciment. Ce type d'adjuvant introduit dans l'eau de gâchage, il est recommandé d'ajouter dans le béton après que **50** à **70%** de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

III.5 Le filler utilisé (Poudre de marbre) :

La poudre de marbre utilisée est un déchet des marbreries collectée directement des ateliers de découpe des plaques de marbre, qui sont concassées, broyées pour obtenir une poudre finement broyée.

Les caractéristiques de la poudre de marbre sont présentées dans les tableaux suivants :



Figure III.6 Poudre du marbre utilisé

Tableau III.20 Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.

densité	Perte au feu %	PH	inflammabilité	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)		Couleur
2.7	41.81	9 +/- 0.5	Non	2400	6668	Blanche

Tableau III.21 Caractéristiques chimiques de la poudre de marbre.

élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
%	0.13	0.11	0.04	0	0.05	57.67	0.17

III.6 Caractéristiques de l'eau de gâchage

Pour notre béton nous avons utilisé de l'eau du robinet disponible au laboratoire de génie civil ..

III.6.1 Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée :

Etablie en au laboratoire de chimie (M'sila). Elle est donnée par (**Tableau III.23**) :

Tableau III.22Caractéristiques physico-chimiques de l'eau.

Paramètre	Mesures
PH	7.62
Conductivité	1450.11c/cm
cl-	0.24mg/l
NO ₂ -	0.15mg/l
SO ₄	180.22mg/l
Turbidité	1.71NTU
Nitrite	0
Résidu sec	100mg/l

Ces résultats montrent que notre eau est apte pour la confection de notre béton.

III.7 Conclusion :

Ce chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux utilisés (Ciment, poudre de marbre, superplastifiant, sable et gravier.). Les résultats obtenus d'après les essais exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de M'sila pour la confection du béton de notre programme expérimental des différentes propriétés chimiques, physiques et mécaniques sont présentées.

Chapitre IV

Techniques Expérimentales

Chapitre IV : Techniques Expérimentales

IV.1. Introduction :

La partie expérimentale est une continuité de la partie théorique pour équilibrer 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 caractériser ce type de béton qui on a choisir. Ces essais on à effectuée dans un laboratoire équipée au niveau de l'université de M'sila.

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 [13].

IV.2.2 Méthode Française :

Méthode française (LCPC) : proposée par [25] :

Au LCPC, un modèle mathématique, ce 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 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.

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 [25].

IV.2.2 Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC :

- **Les données de base :**
 - On a choisi : $G/S=1$.
 - On fixe le rapport $E/(C+F)=0,6$.
 - Le dosage en superplastifiant est donné selon la fluidité (donné par l'essai d'étalement). on vise un étalement de **600 à 750mm**.
- **Optimisation de la composition du BAP**
 - Le volume de la pâte pour $1m^3$ du BAP égale à : **400 kg/m³** du ciment.
 - **40 kg/m³** du poudre de marbre (10% du poids du ciment).
 - $E/(C+F) = 0,6$.
 - $G/S=1$
- **Détermination de la masse de chaque constituant :**
 - On a: $C=400 \text{ kg/m}^3$.
 - $FS= 40 \text{ kg/m}^3$
 - $E/(C+F) = 0,5$ donc $E=0,5*(400+40)$ $E= 220.L/m^3$.
 - $G+S=660$ $G=660-S$.
 - $S=660/2$ $S= 330 \text{ l/m}^3$.
 - $G= 660-330$. $G= 330 \text{ l/m}^3$.
 - Le dosage en superplastifiant est 2% de la masse ciment .
 - $SP=0.02 (400)$.
 - $SP=8,8\text{kg/m}^3$.

Tableau IV.1 : Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode AFGC.

Constituants	Quantité	Unité
Sable Gravier	800	kg /m ³
3/8 Gravier	400	kg /m ³
8/16Ciment	416	kg /m ³
Eau Super	400	kg /m ³
plastifiant	220	kg /m ³
Fin	8.8	kg /m ³
	40	kg /m ³

IV.3. Procédure de fabrication des éprouvettes :

Les éprouvettes ont été fabriquées au laboratoire des matériaux de constructions et les tests sont effectués au même laboratoire à université de M'sila. 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 prismatique 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, poudre de marbre) 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 + poudre de marbre pendant **30 s**.
- ❖ Ajout de l'eau + superplastifiant **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.

IV.4 Essais de caractérisations du béton autoplaçant 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. Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP :

IV.4.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams [NF EN 12 350-8] :

L'essai d'étalement ou slump flow est utilisé pour caractériser la fluidité du béton [27], le matériels et le mode opératoire sont détaillés dans la norme [NF EN 12 350-8] (Figure IV.1)

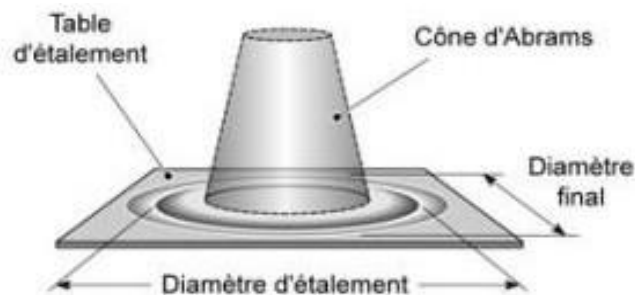


Figure IV.1 : Essai d'étalement par cône d'abrams sur les BAP.

IV.4.2 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 en laboratoire. (Figure IV.2) [28] et critères d'acceptabilité sont indiqués au chapitre (I).

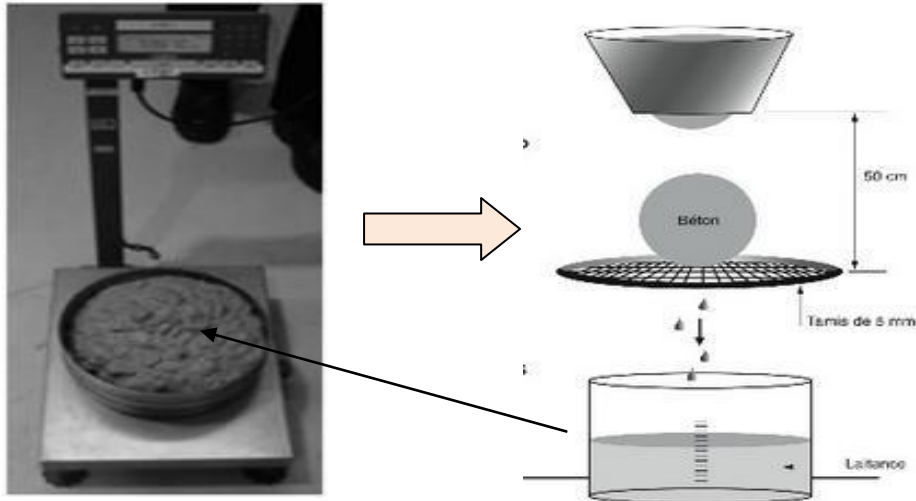


Figure IV.2 : Principe de l'essai stabilité de tamis sur BAP.

Peser le fond avec la laitance :

- On a : $P_{\text{laitances}} = P_{\text{fond}} + \text{laitance} - P_{\text{fond}}$
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon.
- $\delta = (P_{\text{laitance}} / P_{\text{échantillon}}) * 100$

Par ailleurs, la détection d'eau de ressuage lors de l'essai n'est pas acceptable. Cela induit des risques de tassement, de délavage du parement et d'altération de la perméabilité [28].

IV.4.3 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].

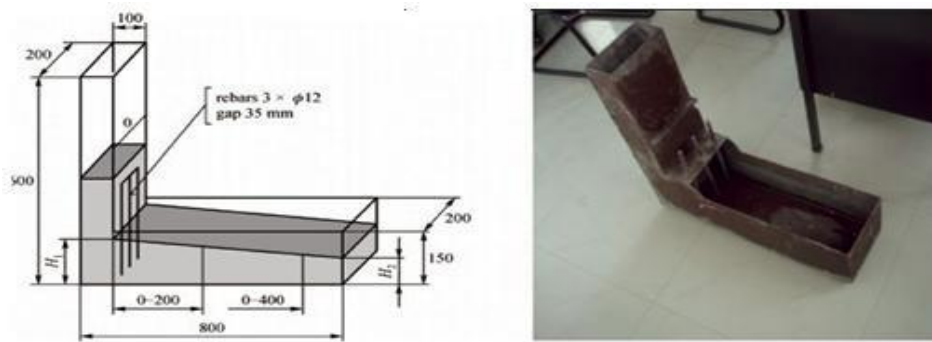


Figure IV.3 : Boite en L pour le béton autoplaçant.

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

IV.5.1 Essai compression [NF EN 206-1] :

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

On a : S : section de l'éprouvette : 100 cm^2 . F : force au moment de la rupture.



Figure IV.4: Essai compression : a) machine et éprouvette, b) éprouvette détruite.

IV.5.2. Essais traction par flexion [NF EN P 18-408] :

C'est un essai qui consiste à écraser un prismatique ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) de béton (Figure IV.5) . On calcule de la résistance en traction du béton R_t un terme correctif de $0,6$ ($R_t = 0,6 R_{tf}$) [27].

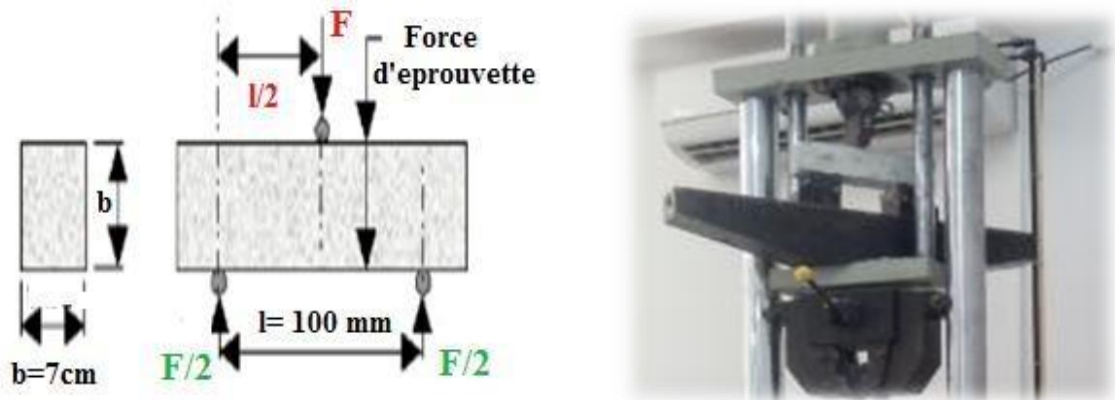


Figure IV.5 : Principe de l'essai traction par flexion.

IV.5.3. Module d'élasticité :

Par l'équation: $\sigma = E * \varepsilon$. La formule réglementaire du module: $E=11000f_c^{1/3}$

IV.5.2. Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NF EN 12398] :

On a détails ce type de l'essai d'une façon a profondu dans le chapitre (II) (Figure IV.6) .



Figure IV.6 :Principe de l'essai scléromètre.

IV.5.4. Les Ultrasons [NF EN 12504-4] :

Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation desimpulsions ultrasoniques traversant le béton (Figure IV.7) .



Figure IV.7 : Appareil ultrason.

IV.6 Confection des éprouvettes :

IV.6.1. Type et tailles des moules :

Les moules, utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules en acier de forme (Figure IV.8) :

→ Prismatique ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$)

→ Cubique ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$).

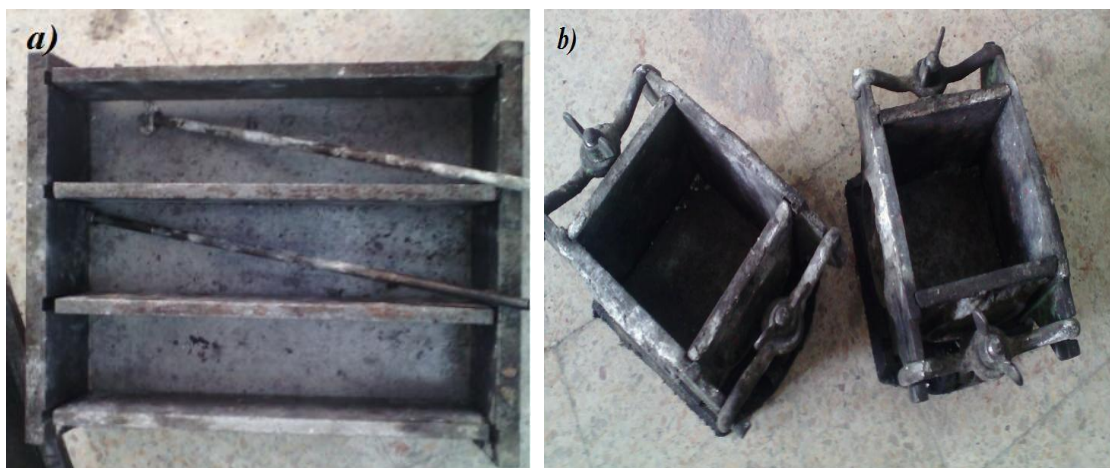


Figure IV.8: Type des éprouvettes utilisés :a) prismatique, b) cubique.

IV.6.2. 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± 2°c**.

IV.7. Conclusion :

Les connaissances acquises depuis l'apparition des BAP et la meilleure maîtrise de toutes les étapes (formulation, fabrication, mise en œuvre et contrôle) sont suffisantes pour permettre l'utilisation de ces bétons dans de nombreuses applications.

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

Chapitre V

Résultats et discussions

Chapitre V : Résultats et Discussions

V.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus du programme d'essais, l'analyse et l'interprétation de ces derniers pour des bétons autoplaçants à base de poudre de marbre. comprendre l'influence des principaux constituants sur le comportement des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci, et optimiser une formulation de béton autoplaçant à base de poudre de marbre. Différents mélanges confectionnés avec différents pourcentages de PM (5%,10%, 15 % et 20%) ont été réalisés.

V.2. Les formulations des bétons étudiés :

- ❖ BAP_{5%} → Béton auto plaçant normal avec l'ajout de 5% poudre de marbre.
- ❖ BAP_{10%} → Béton auto plaçant normal avec l'ajout de 10% poudre de marbre.
- ❖ BAP_{15%} → Béton auto plaçant normal avec l'ajout de 15% poudre de marbre.
- ❖ BAP_{20%} → Béton auto plaçant normal avec l'ajout de 20% poudre de marbre.

V.3. Présentation des 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 [25].

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

Premièrement on présente 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 :

Ess. de cône d'Abrams (essai d'étalement pour les milieux non confiné) [NF EN 12 350 -8].

Ess. boîte en L (contrôlée l'écoulement dans les milieux confiné) [NF EN 12 350 -10].

Ess. de stabilité au tamis (pour étudier la ségrégation) [NF EN 12 350 -11].

Le tableau V.1 présente les résultats des essais rhéologiques des BAP avec l'ajout, poudre de marbre, ainsi que leurs masses volumiques.

Tableau V.1 : Caractéristiques rhéologiques des BAP étudiés.

Type du béton	Étalement (cm)	Stabilité au tamis (%)	Boîte en L(h2/h1)(%)
BAP _{5%}	74.66	29.18	93
BAP _{10%}	64.5	10	87
BAP _{15%}	70	21.3	93
BAP _{20%}	73.4	21.94	87

Commentaire :

D'après les résultats obtenus dans le tableau précédent, on note que les étalements des bétons autoplaçant testés sont supérieurs à 60 cm, le taux de remplissage de la boîte 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.

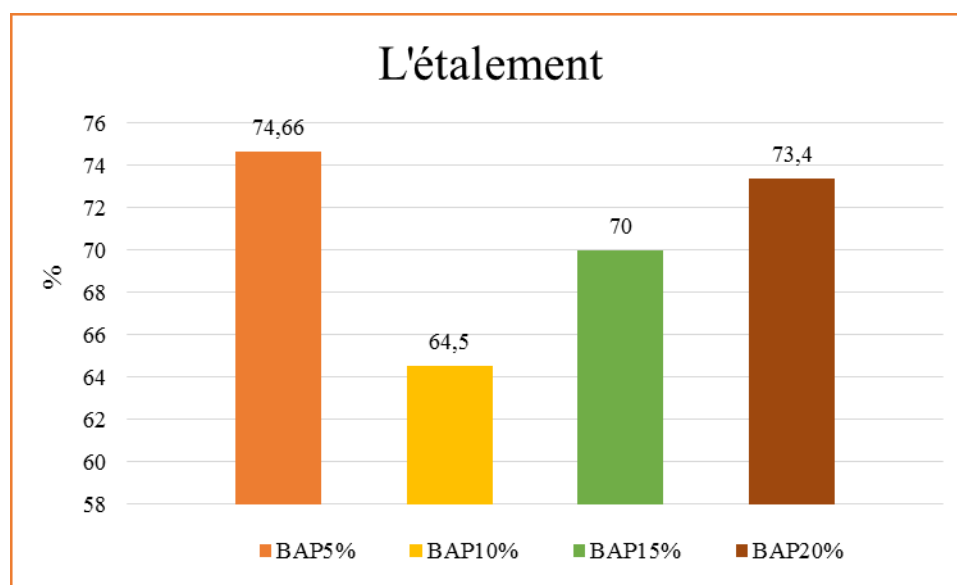


Figure V.1 : l'étalement en fonction du type de béton.

Les valeurs d'étalement sont habituellement fixées entre 60 et 75 cm. [25]

On constate que, le mélange avec 10 % poudre de marbre donne la plus faible valeur d'étalement (64.5 cm) mais c'est un des critères d'acceptabilité (60-75cm)

D'après les résultats dans le tableau V.1 et la figure V.1, on remarque que tous les BAP avec une utilisation d'ajouts (5%, 15% et 20%) donne des valeurs d'étalement dans la marge de (70 – 74.66) cm justifié par les normes en vigueur.

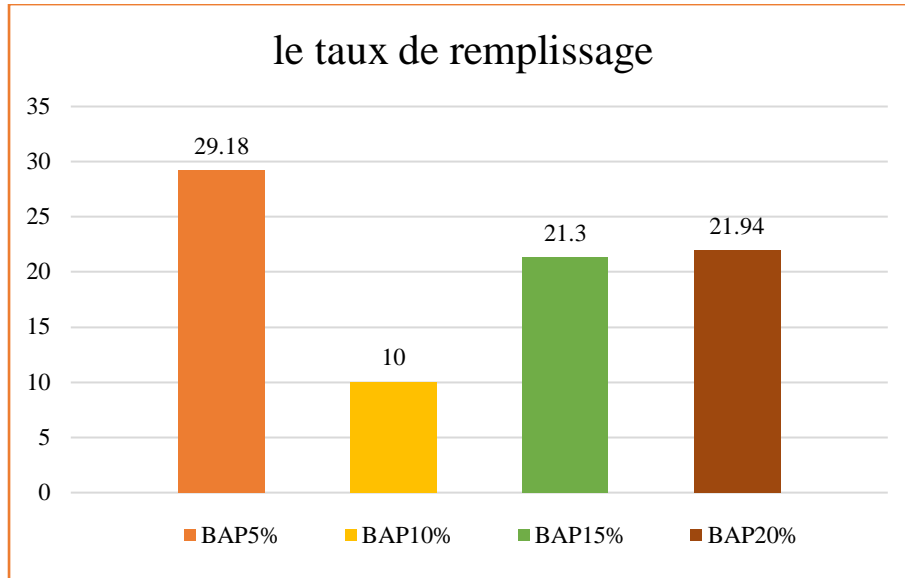


Figure V.2 : Le taux de remplissage en fonction du type de béton.

D'après la figure V.2, les trois mélanges 5% et 15% et 20% indiquent un taux de remplissage supérieure à 15% donc c'est une stabilité critique. Par contre le mélange 10% réalisé indiquent une bonne stabilité au tamis et une bonne homogénéité sans ségrégation statique. donc c'est une Stabilité suffisante

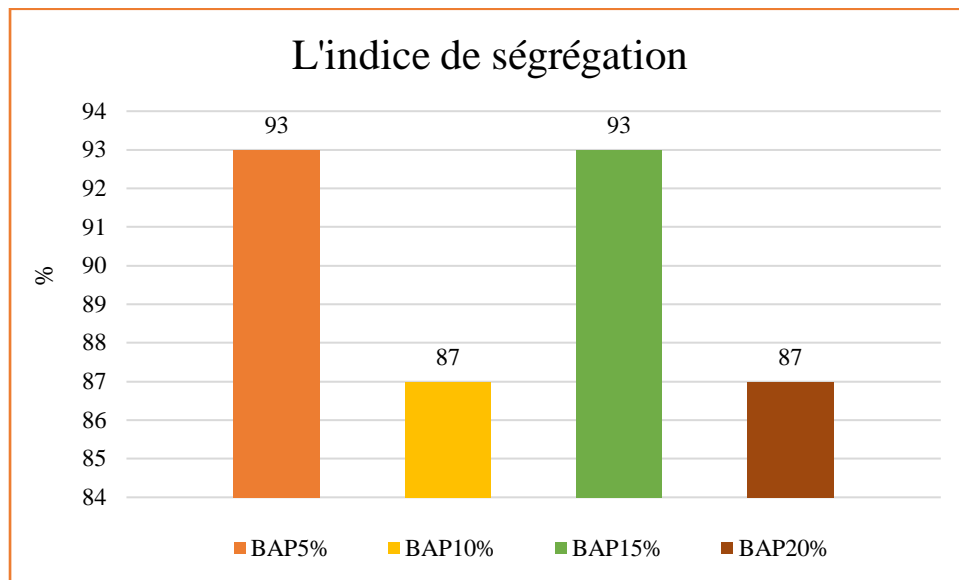


Figure V.3 : L'indice de ségrégation dynamique en fonction du type de BAP (L-box test).

Les résultats obtenus par l'essai de la boîte en L sont présentés sur la figure V.3, ce type d'essai permet de vérifier la capacité d'un béton à s'écouler dans un

milieu confiné. La plupart des bétons étudiés enregistrent des indices de ségrégation supérieure à (0,80) estimés acceptables par ce test selon les normes en vigueur pour les bétons auto-plaçants. Ceci peut être expliqué par l'effet suivant :

Le BAP témoin présentant des indices de ségrégation supérieur à 0.8. Les BAP avec le filler de marbre ont présenté aussi des indices de ségrégation proche de ce dernier alors on peut dire que le remplacement d'une partie du ciment à un dosage de poudre de marbre qui peut atteindre 20% n'affecte en rien la mobilité du béton en un milieu confiné.

V.3.2. Caractérisation des bétons à l'état durci :

V.3.2.1. Résistance à la traction par flexion (R_t) :

Le tableau VI.2 et la figure V.5 ci-dessous présentent les caractéristiques mécaniques des mélanges des BAP avec additions (ajout par la poudre de marbre) selon des pourcentages variables de (5%, 10%, 15% et 20%) respectivement, par poids du ciment.

Tableau V.2: La résistance à la traction par flexion des BAP étudiés (R_t).

Résistance à la traction par flexion à 28 (jours)				
Types(BAP)	BAP5%	BAP10%	BAP15%	BAP20%
R_t (KN)	5.23	5.6	6.63	5.9

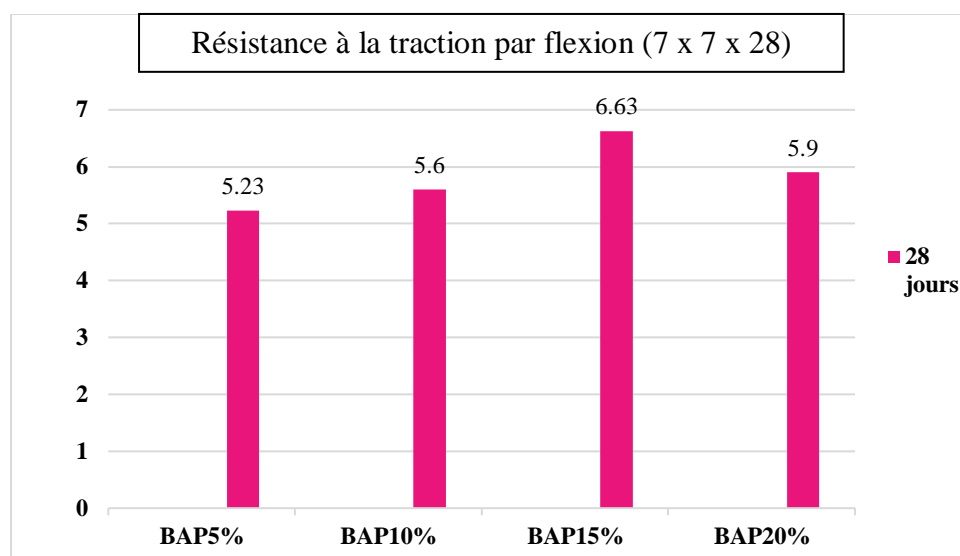


Figure V.4 : Évolution de la Résistance à la traction par flexion en fonction du type du béton à 28 jours.

D'après les résultats inscrits dans le tableau V.2 et la figure V.4 ci-dessus, on trouve une augmentation de résistance à la traction par flexion de l'ordre de 21.11 % dans la formulation contenant 15% de la poudre de marbre par rapport de formulation 5% de poudre de marbre et une réduction d'environ 11.01% pour celle qui contient 15 % de poudre de marbre.

Donc on peut déduire que l'introduction de la poudre de marbre joue un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des BAP à certain dosage, et ceci est en accord avec nos résultats.

V.3.2.2. Résistance à la compression (R_c) :

Tableau V.3: La résistance à la compression (R_c) des BAP étudiés à 7, 14 et 28 jours.

Type de béton	Résistance à la compression R_c en (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BAP5%	42.85	50.11	50.46
BAP10%	24.86	33.57	41.59
BAP15%	50.36	51.83	54.08
BAP20%	41.44	44.33	53.84

On remarque dans le tableau V.3 que BAP15% de (15% poudre de marbre montre une résistance de 54.08 MPa, et enregistre une amélioration au environ de 23.09% par rapport à BAP10% dont la résistance a atteint 41.59 MPa

Le BAP10% enregistrent une réduction de 17.57% par rapport à BAP10% (05 % poudre de marbre).

Le BAP20% montre des résultats presque similaires avec le BAP15% (15 % poudre de marbre).

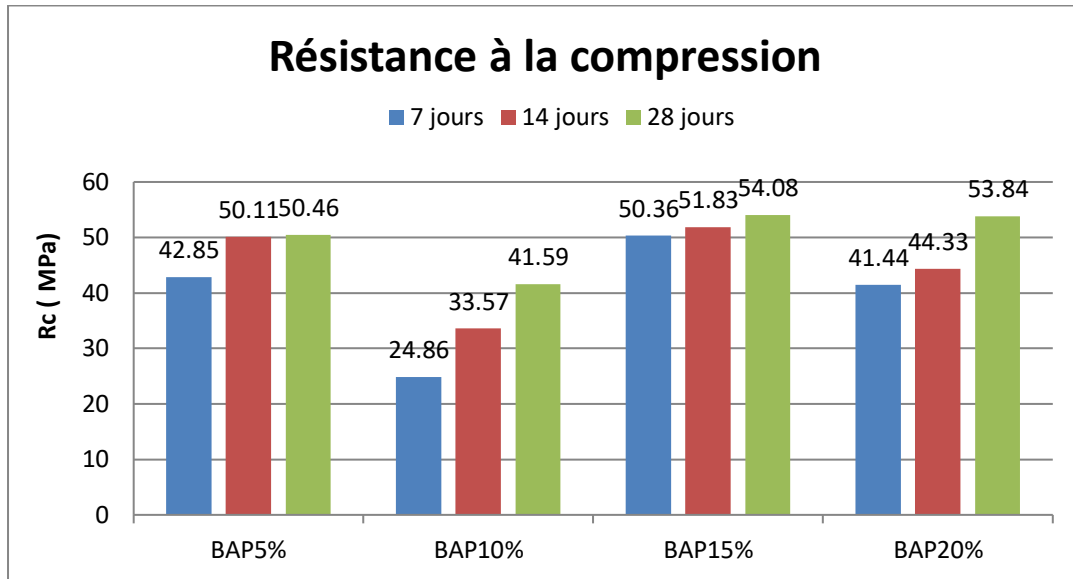


Figure V.5 : Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge des BAP.

On observe que pour tous les BAP la résistance à la compression augmente avec l'âge de ces derniers.

D'après la figure V.5 le BAP10% avec un poudre de marbre 10% indique une faible résistance par rapport aux autres types de béton. Cette réduction dépend de la nature, de la finesse et du dosage de poudre de marbre. Le dosage au-delà de 15% pour le poudre de marbre semble avoir un effet drastique sur les propriétés rhéologiques du BAP et par conséquent sur les caractéristiques et le durcissement donc sur le développement de la résistance.

Même l'utilisation du superplastifiant dans les formulations des BAP qui peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique en cas de sous ou surdosage de ce dernier [30].

Donc, l'introduction poudre de marbre jouer un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des BAP. Cette amélioration des résistances dépend de la nature, de la finesse et du dosage de poudre de marbre. Même l'utilisation du superplastifiant (SP30) dans les formulations des BAP qui peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique.

Tableau V.4: La résistance à la compression (Rc) des BAP étudiés à 28 jours

15x15x15

Résistance à la traction par flexion à 28 (jours)				
Types(BAP)	BAP5%	BAP10%	BAP15%	BAP20%
Rt(kN)	50.34	42.9	54.39	51.76

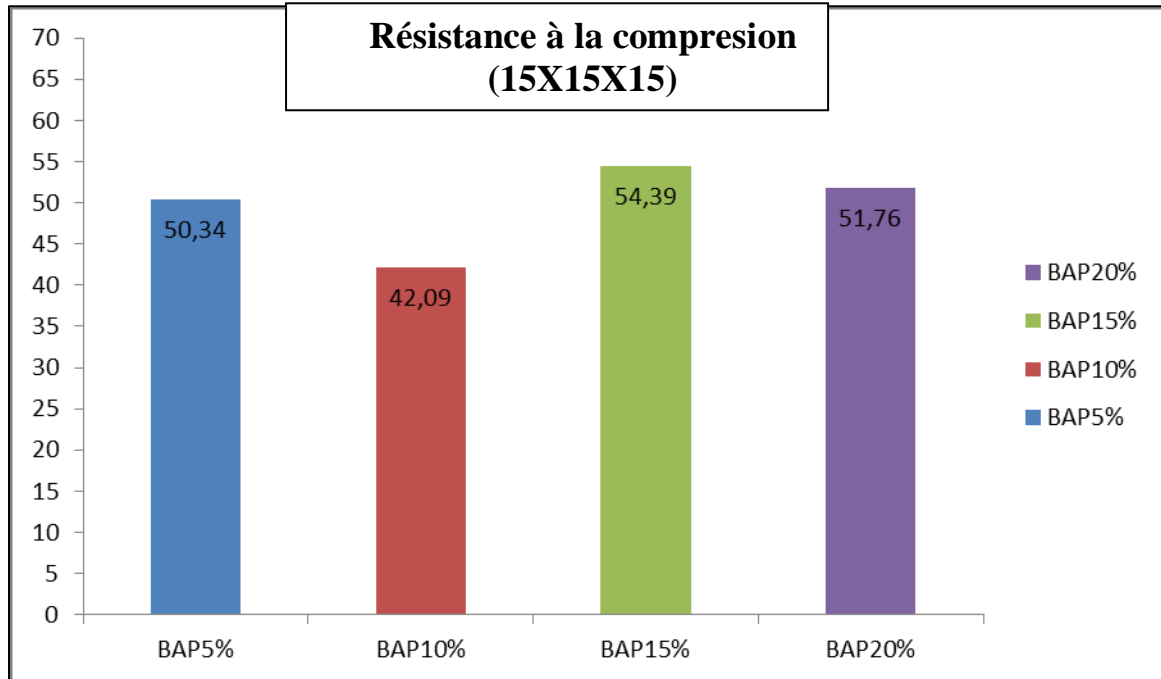


Figure V.6 : Évolutions de la résistance à la compression (Rc) des BAP étudiés à 28 jours

D'après les résultats inscrits dans le tableau V.4 et la figure V.6 ci-dessus, On remarque que BAP15% de (15%poudre de marbre montre une résistance de 54.34 MPa, et enregistre une amélioration au environ de 21.12% par rapport à BAP10% dont la résistance a atteint 42.09 MPa et enregistrent une réduction de 14.47% par rapport à BAP05% dont la résistance a atteint 50.34 MPa

Le BAP05% montre des résultats similaires avec le BAP20% (20% poudre de marbre)

V.4. Essais non destructifs (END) :

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

Tableau V.5 : Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP étudiés.

Type de béton	Résistance à la compression		Age (jours)	Scléromètre		Ultrason			
	RC (Mpa)	RC (Mpa)		Indice (IS)	Moy	t (µs)	Moy	V (m/s)	Moy
BAP5%	43.77	42.85	7	19.37	21.91	9	9.46	11050	10562.6
	42.76			21.66		9.2		10850	
	42.02			24.71		10.2		9788	
	50.20	50.11	14	24.7	25.36	9.5	9.9	10471	9579.3
	52.89			25.9		10.2		9479	
	47.26			25.5		10		8788	
	50.03	50.46	28	42.33	39.99	13	14	7712	7954
	47.67			39		12.4		8075	
	53.70			38.66		12.4		8075	
BAP10%	25.42	24.86	7	13	14.5	11.7	11.56	8570	8650
	24.28			16.5		11.5		8690	
	24.90			14		11.5		8690	
	31.61	33.57	14	22.66	28.88	11.9	11.73	8785	8632
	34.74			26.88		11.1		8915	
	34.38			37.11		12.2		8196	
	40.3	41.59	28	34.66	32.99	14.9	14.73	6719	6874.3
	46.37			31.33		14.9		6952	
	38.10			33		14.4		6952	
BAP15%	41.43	50.36	7	28.94	25.13	10.5	10.46	9554	9634
	55.73			26.50		11.4		8785	
	53.94			20.40		9.5		10563	
	56.67	51.83	14	42	39.44	9.7	10.66	10292	9421.6
	47.95			39		11.4		8785	
	50.88			37.33		10.9		9188	
	52.60	54.08	28	44.3	44.06	13.2	13.96	7566	7173.6
	52.57			43.18		14		7160	
	57.07			44.72		14.7		6795	
BAP20%	47.55	41.44	7	31.33	32.88	8.6	7.9	1077	12430.6
	45.08			27.33		7.4		1327	
	31.70			40		7.7		1327	
	37.81	44.33	14	33.66	34.88	9.5	9.56	1125	10790.6
	41.34			32		9.7		1029	
	53.86			39		9.5		1085	
	53.80	53.84	28	42.72	37.24	13.7	14.36	7290	6960
	53.85			38.12		14.7		6795	
	53.87			30.90		14.7		6795	

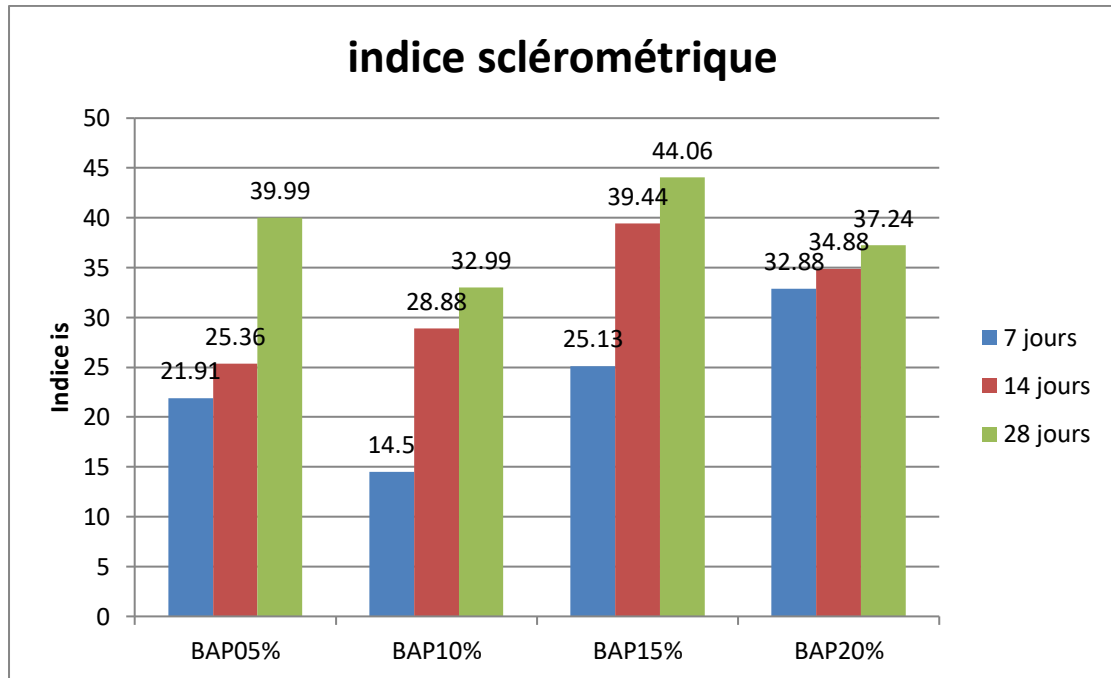


Figure V.7: Evaluation de l'indice sclérométrique en fonction de l'âge pour les BAP étudiés.

la figure V.7 représente l'historique des valeurs de l'indice sclérométrique des différents bétons autoplaçants en fonction de l'âge. Ce graphe montre que le béton à 15% de poudre de marbre donne la plus grande valeur par une amélioration de 25.12% par rapport de BAP10% à 28 jours d'âge.

le béton à 10% de poudre de marbre enregistrent une réduction de 17.50% par rapport de BAP05% à 28 jours d'âge.

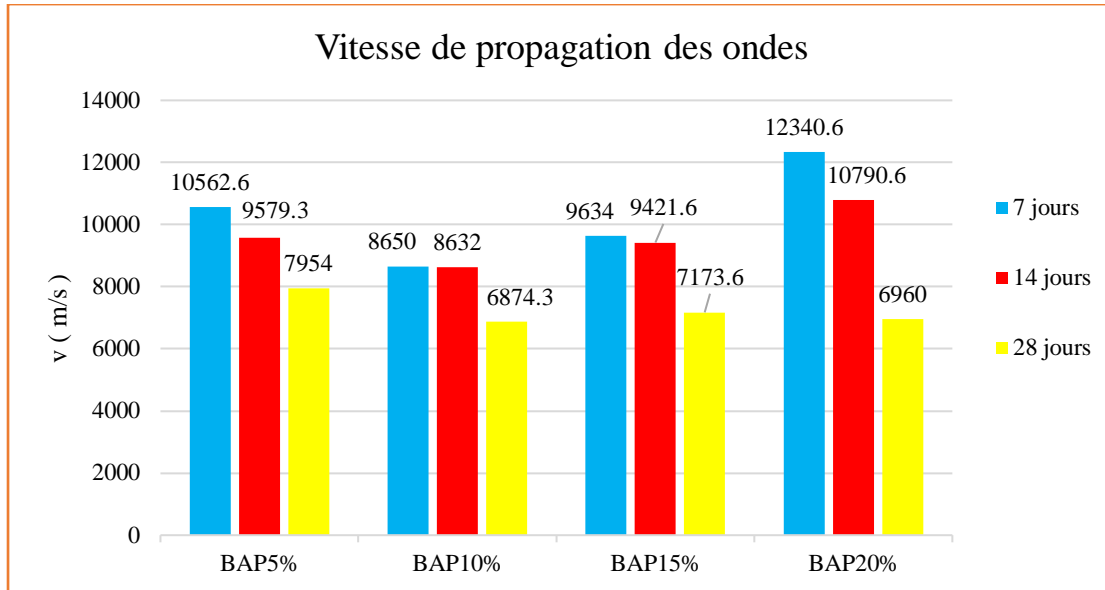


Figure V.8: Evaluation de vitesse de propagation des ondes en fonction de type de BAP.

Selon la figure V.8, on remarque une vitesse de propagation du son qui est au-delà de 4 Km/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 aux valeurs obtenues de résistances à la compression (écrasement) ou en fonction de l'indice sclérométrique ; ces résultats tout de même restent indicatifs. Toujours en fonction du dosage de poudre de marbre, il y a une amélioration selon l'âge de bétons 7, 14 et 28 jours.

Remarque [31]:

- 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.5. Essai pour la durabilité :

V.5.1. L'absorption (A):

Dans cette partie on a étudié le taux d'absorption capillaire en pourcentage de l'addition pour les différents types de **BAP**, les résultats de l'essai sont indiqués dans le tableau V.6 suivant:

Tableau V.6: Résultat de L'absorption capillaire (A) pour les BAP étudiés.

Taux d'absorption en (%) à 28 (jours)	Type de béton	Ms (kg)	Mh (kg)	Ω (%)	Ω _{moy} (%)
	BAP5%	1675	1734.5	3.5	3.5
		1636	1694.4	3.5	
		1665	1724.7	3.5	
		1625	1681.8	3.5	
	BAP10%	1657	1711	3.2	4.6
		1558	1631	4.6	
		1622	1705	5.1	
		1499	1582	5.5	
	BAP15%	1700	1759.1	3.4	3.05
1781		1837	3.1		
1865		1924.1	3.1		
1666		1710.9	2.6		
BAP20%	1558	1615	3.6	3.27	
	1342	1380	2.8		
	1785	1847	3.4		
	1386	1434	3.3		

La figureV.9, représente l'histogramme des différentes valeurs du taux d'absorption des différents bétons autoplaçants étudiés.

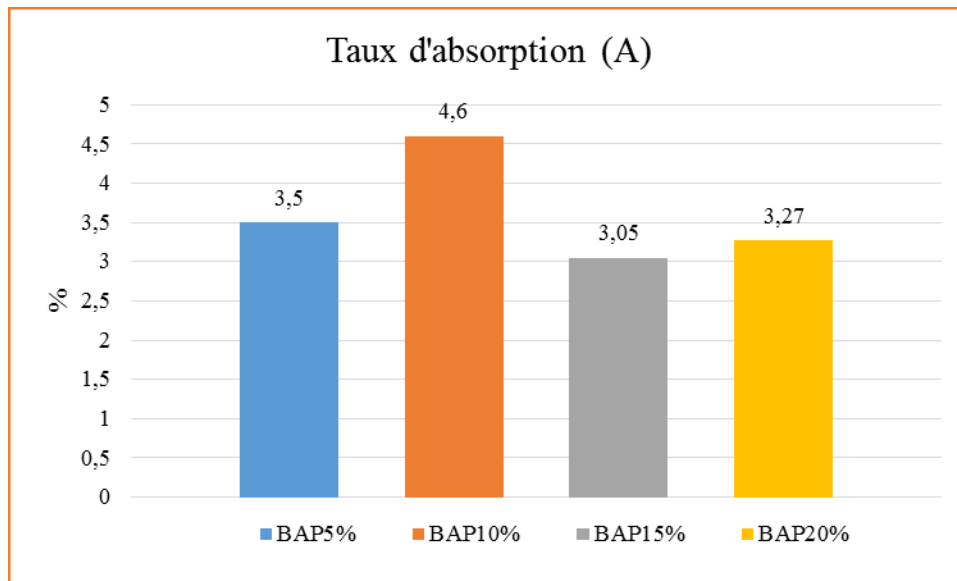


Figure V.9: Evaluation de taux d'absorption (A) des différents BAP étudiés.

Le BAP10% indique un taux d'absorption maximal de 4.6 % (10%PM), suivi du BAP5% à une valeur de 3.5% (5%PM) et BAP20% une valeur de 3.27% (20%PM), avec une augmentation de 33.69%, 12.85% et 6.72%, respectivement par rapport au béton de BAP15% (15%PM) indique un taux d'absorption minimal de 3.05%.

Cela peut s'expliquer par la faible porosité ou la présence de quelques vides Rempli d'eau après immersion en termes de types d'ajout et de dosage.

V.6. Conclusion:

D'après les résultats expérimentaux obtenus, on peut dire que notre béton est caractérisé comme un béton autoplaçant selon les critères de l'AFGC, qui présente un étalement compris entre (600 à 750mm) et un rapport de la boîte supérieure à 0.8 et une stabilité en tamis inférieure à 30%.

l'utilisation de la poudre de marbre comme addition minérale dans les BAP est très avantageux aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Du point de vue de durabilité, le remplacement du ciment par de la poudre de marbre confère aux BAP une meilleure résistance aux agents sulfatiques.

En ce qui concerne le coût de production des BAP, les résultats obtenus montrent qu'il est possible de le réduire en utilisant un ciment composé comportant la poudre de marbre.

À travers les résultats obtenus nous pouvons dire que la teneur optimale en poudre de marbre est de 15%. Un tel pourcentage permet de produire un BAP moins onéreux de bonne rhéologie.

Conclusion générale

Perspectives

Les références bibliographiques

Conclusion générale

L'utilisation des déchets récupérés de certaines usines et unités de fabrication de matériaux de construction peuvent être une alternative comme substitution au clinker composant principal du ciment CSR. Dans le cas du béton autoplaçants en comparaison avec un béton normal cette partie de fillers qui rentre dans la composition de la squelette de la matrice cimentaire (BAP) est essentielle pour le comportement rhéologique à l'état frais et voir même la résistance et la durabilité dans l'état durci . Donc à titre d'amélioration de performances (rhéologiques, résistance et durabilité), on opte pour l'ajout (poudre de marbre) avec (super plastifiant, MEDAFLOW 30), un adjuvant local produit par l'entreprise GRANITEX..

L'objectif de cette étude est de montrer l'influence de l'ajout de poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques à l'état frais et la résistance mécanique à l'état durci. On a effectué des essais de mesure de rhéologie sur béton à base d'ajout de poudre de marbre à des taux variables de 5,10,15 et 20% de la masse du ciment.

L'utilisation de la poudre de marbre comme addition minérale dans les bétons autoplaçants contribue à l'amélioration de la déformabilité et de la capacité de passage et de remplissage.

L'utilisation du super plastifiant "MEDAFLOW 30" dans les formulations de bétons peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique.

L'étude préliminaire réalisée sur des bétons a permis de tirer les enseignements suivants :

- L'addition de poudre de marbre dans la composition des BAP permet de réduire la quantité du ciment produite, et la quantité du dioxyde de carbone CO₂émise dans l'atmosphère qui l'associé.
- La substitution de la poudre de marbre dans le ciment permet de baisser le coût de production des BAP.
- l'augmentation du dosage en filler à une influence significative sur le développement des résistances, voire même, une diminution, pour un taux d'ajout supérieur à 15% (54.08 Mpa).

- Du point de vue de rhéologie et d'ouvrabilité, le remplacement de 15% du ciment par de la poudre de marbre est très bénéfique (Boite en L93% Slump 70cm et stabilité au tamis 21.3%).
- L'utilisation de la poudre de marbre conduit à une diminution de l'expansion des bétons autoplaçants et leurs confèrent des meilleures résistances aux attaques sulfatiques ou une diminution de l'absorption est constatée dans le ca du BAP 3.05% avec un pourcentage de fillers de marbre égale à 15%

Perspectives

A l'issue de cette étude sur l'utilisation de la poudre de marbre pour la confection des BAP à base de produit locaux ; on propose comme futurs travaux ce qui suit ;

La poudre de marbre est un matériau nouvellement introduit dans les matériaux à matrice cimentaire. Peu de travaux sont conduits sur ce matériau malgré les multiples avantages qu'il présente notamment économiques, écologiques et techniques.

Sur le plan économique, dans certains pays, comme la Turquie par exemple qui dispose de circuit de récupération, ce qui n'est pas le cas de l'Algérie, le recyclage de la poudre de marbre n'a pas encore vu le jour.

Sur le plan écologique, la mise en décharge des déchets de poudre de marbre peut constituer une forte pollution.

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 tel que : la durabilité dans des milieux chimiquement agressifs, autres comportements mécaniques que la résistance à la compression et traction comme la résistance au gel/dégel, la fatigue ou encore l'endommagement.

De plus, des études sur la microstructure doivent être approfondies, afin de confirmer la faisabilité de ce type de béton dans le domaine de construction.

- [1] 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.
- [2] Hamouine.A, « *fabrication du béton autoplaçant à base des matériaux locaux de la région Saoura* », thèse doctorat de centre l'université de Bachar, 2000.
- [3] Yagoub.M, « *matériaux de construction (chapitre 2)* », cours en génie civil, université Mohamed Khaider à Biskra, 2009.
- [4] NF EN 197-1, « *ciment, composition et critères* », l'association française de normalisation, Février 2001.
- [5] 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.
- [6] CIM béton, « *le ciment et ses applications* », 10^{ème} édition, a principe Paris, Juillet 2001.
- [7] NF P 15-010, Octobre 1997.
- [8] Dreux.G et Festa.J, « *nouveau guide du béton et de ses constituants* », 8^{ème} édition, Eyrolles, 1998.
- [9] 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.
- [10] Ali Bouzidi, « *généralité sur les adjuvants* », cours en génie civil, université M'Hamed Bouguerra Boumerdes, Décembre 2016.
- [11] Paco Sabatier, « *contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçants du béton* », thèse doctorat, université Toulouse, Décembre 2010.
- [12] Laifa Walid, « *contribution à l'étude des effets du laitier cristallisé et des fibres de diss sur les propriétés des bétons autoplaçants* », thèse doctorat, université Badji Mokhtar à Annaba, 2015.
- [13] 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.
- [14] Association française de génie civil, « *Recommandations pour l'emploi des Bétons*

autoplaçants », 2008

[15] Notice technique, « MEDAFLOW 30 », norme EN 934-2, société Granitex, Alger.

[16] .

[17]<http://www.lafargealgerie.com/>.

[18].

[19] Benamrane Toufik Amine, « caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et essai direct (ED) d'un béton recyclé adjuvanté à base des matériaux locaux », mémoire master, Juin 2015.

[20] <http://thesis.univ-biskra.dz/2446/3/chapitre1.pdf>.

[21] [Adams et Race, 1990].

[22] [Ramachandan et Zhang Chuin-mei, 1986].

[23] Mezghiche Bouzidi, « norme, matériaux, mélanges et essais utilisées », cours de 3^{ème} année licence, université Mohamed Khaider, Biskra, 2013.

[24] Mezghiche Bouzidi, « essais non-destructifs du béton », cours de 3^{ème} année licence, université Mohamed Khaider, Biskra, 2013.

[25] AFGC, « bétons autoplaçants - recommandations provisoires », documents scientifiques et technique .

[26]..

[27] Okamura A et Ouchi M, « self-compacting concrete », journal of advanced concrete technology, vol 1, P5-P15, 2003.

[28] Sedran T, « rhéologie et rhéomètre des bétons application au béton autonivellant », thèse doctorat, école nationale des ponts et chaussées, 1999.

[29] Gadri.K, Guettala.A, « évaluation du module d'élasticité à la compression à l'aide des techniques non destructives », 22^{ème} congrès français de mécanique, Lyon, 28 août 2015.

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

[31] Oubraham. Ch, Benmounah. A, « Etude comparative des paramètres rhéologiques et physico-mécaniques des coulis de ciment avec ajout de pouzzolanes naturelles et fumée de silice en présence de superplastifiant », thèse doctorat, Rencontres Universitaires de Génie Civil, France, May 2015.

Résumé

Les bétons auto plaçant se distinguent par une fluidité extrême, permettant leur mise en place sans vibration. Les additions minérales et les adjuvants sont deux composants indispensables pour la formulation des bétons auto plaçant (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.

. Toutefois, pour réduire le coût de production des BAP, le liant est souvent un composé binaire voire ternaire : ciment Portland mélangé avec poudre de marbre, poudre de verre, fumée de silice, cendres volantes, etc.

L'objectif de cette étude est de montrer l'influence de l'ajout de poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques à l'état frais et la résistance mécanique à l'état durci. On a effectué des essais de mesure de rhéologie sur béton à base d'ajout de poudre de marbre à des taux variables de 5,10,15 et 20% de la masse du ciment.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du dosage en poudre à une influence significative sur le développement des résistances, voire même, une diminution de l'absorption, pour un taux d'ajout supérieur à 15%.

Mots clés : béton autoplaçant (BAP), fumée de silice, fillers de calcaire, propriétés rhéologiques, résistance mécanique.

Abstract

Self-placing concretes are characterized by an extreme fluidity, allowing their placement without vibration. Mineral additions and admixtures are two essential components for the formulation of self-placing concrete (SPC); they are the two components that govern the rheological behavior of these concretes. The mineral additions are introduced into the concrete to improve its rheological behavior in the fresh state, but also to participate in the mechanical properties and durability of the concrete. However, to reduce the production cost of the BAP, the binder is often a binary or even ternary compound: Portland cement mixed with marble powder, glass powder, silica fume, fly ash, etc.

The objective of this study is to show the influence of the addition of marble powder on the rheological properties in the fresh state and the mechanical resistance in the hardened state. Rheology measurement tests were carried out on concrete based on the addition of marble powder at variable rates of 5, 10, 15 and 20% of the mass of the cement.

The results obtained show that increasing the powder dosage has a significant influence on the development of resistance, or even a decrease in the absorption indicating sustainable concrete, for an addition rate greater than 15%.

Keywords: self-compacting concrete , silica fume, limestone, rheological, mechanical resistance.

ملخص

تتميز الخرسانة ذاتية الوضع بالسيولة الشديدة ، مما يسمح بوضعها دون اهتزاز. الإضافات والمواد المساعدة المعدنية مكونان أساسيان لتشكيل الخرسانة ذاتية الصب ؛ هذان هما المكونان اللذان يحكمان السلوك الريولوجي لهذه الخرسانة. يتم إدخال الإضافات المعدنية في الخرسانة لتحسين سلوكها الريولوجي في الحالة الجديدة ، ولكن أيضاً للمشاركة في الخواص الميكانيكية ومتانة الخرسانة.

الهدف من هذه الدراسة هو إظهار تأثير إضافة مسحوق الرخام على الخواص الريولوجيا في الحالة الطازجة والمقاومة الميكانيكية في الحالة المتصلبة. تم إجراء اختبارات قياس الريولوجيا على الخرسانة بناءً على إضافة مسحوق الرخام بمعدلات متغيرة 5 و 10 و 15 و 20% من كتلة الإسمنت.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن زيادة جرعة المسحوق لها تأثير كبير على تطور المقاومة ، أو حتى النقصان للحد من الامتصاص ، لمعدل إضافة أكبر من 15% مسحوق الرخام من كتلة الاسمنت.