

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

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

N° :



DOMAINE : GENIE CIVIL

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: Berra Manel

Intitulé

***Caractérisation aux moyens des essais
destructifs et NDT d'un BAP à base de granulats
recyclés et fumée de silice***

Soutenu devant le jury composé de:

Pr.Nasri A/Ghani	Université M'SILA	Président
Dr.Belagraa Larbi	Université M'SILA	Rapporteur
Dr.Meddah A/Aziz	Université M'SILA	Examineur

Année universitaire :2016 /2017



Remerciement

Le premier remerciement c'est pour dieu qui nous a permis d'être dans cette situation et d'avoir accompli cette formation.

*Merci, « **Dr. BELAGRAA Larbi** » qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, ainsi que pour son soutien tout au long de réalisation de ce projet.*

Merci, mes chers parents, vous source de mon énergie dans la vie, base de ma réussite et mon appui dans tous les temps.

*Et toutes mes amies de spécialités « **Matériaux de construction** ».*

*Et tous mes enseignants du département de génie civil surtout « **Dr. BAALI Laid** », chef de département, qui m'a encouragé à donner le meilleur de moi-même en assurant une Formation aussi meilleure que possible.*

*Je remercie également, les membres de jury et responsable des laboratoires matériaux de construction « **BAKHTI Yammna** ».*

*Je remercie aussi « **Pr. RAHMOUNI Zin Elabidine** » qui aide moi toujours au niveau de département génie civil et au domaine de mon spécialité.*

« BerraManel »



Dédicace Dédicace



Je dédie premièrement mon travail à mes très chers parents :

*« **Khaled** » et « **Salima** ».*

*Et ma grande famille : « **Berra** ».*

*Je dédie à mes frères: « **Brahim et Chakib** » et à mes sœurs « **Aya et Randa** et leur fils « **Mohamed Khaled** », son mari « **Walid** ».*

*A mon marié « **Adel** » Qui a été toujours avec moi donne mon cycle d'étude et mon fils « **Mohamed Amine** ».*

*Je dédie à mes chers amies « **Omri Imen Yamina** » ancienne étudiante de promotion 2015 spécialité « **Matériaux** » et « **Chadi Lamis** ».*

*« **BerraManel** »*



Table des matières

Introduction générale

Introduction	1
Problématique.....	1
Objectifs de l'étude.....	2
Structure de ce mémoire.....	3

Chapitre I : Revue générale sur le béton autoplaçants

I.1. Introduction.....	4
I.2. Les principaux constituants d'un béton autoplaçants.....	4
I.2.1. Le ciment.....	5
I.2.2. Les granulats.....	5
I.2.3. Eau.....	6
I.2.4. Additions minérales.....	6
I.2.4.1. Différents types d'additions minérales.....	7
I.2.5. Adjuvants (superplastifiant).....	8
I.3. Formulation d'un béton autoplaçants.....	8
I.3.1. Approches de formulation.....	9
I.4. Caractérisation des bétons autoplaçants.....	10
I.4.1. Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais.....	10
I.4.1.1. Essai d'étalement.....	10
I.4.1.2. Essai de boîte en L.....	10
I.4.1.3. Essai de stabilité au tamis.....	10
I.4.2. Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état durci.....	11
I.4.2.1. Résistance mécanique.....	11
I.4.2.2. Le module élastique.....	11
I.4.2.3. Retrait.....	12
I.5. Propriétés physico-chimique et durabilité d'un BAP.....	12
I.5.1. Absorption capillaire.....	12
I.5.2. Carbonatation.....	12
I.6. Domaine d'application de BAP.....	12

I.7. Avantages et inconvénients d'un béton autoplaçants.....	13
I.8. Effet de la fumée de silice sur le BAP.....	13
I.9. Mode d'action de la fumée de silice.....	14
I.9.1. L'effet pouzzolanique.....	14
I.9.2. L'effet granulaire.....	14
I.10. Caractéristiques des fumées de silice.....	15
I.11. Les formes de la fumée de silice.....	15
I.12. Dosage de la fumée de silice dans le béton.....	16
I.13. Role de la fumée de silice dans le béton frais.....	16
I.14. Role de la fumée de silice dans le béton durci.....	16
I.15. Avantages de la fumée de silice.....	17
I.15.1. Sur la maniabilité et durabilité.....	17
I.15.2. Sur la performances mécaniques.....	17
I.16. Sources de déchets utilisées en génie civil.....	18
I.16.1. Déchets de construction et de démolition.....	18
I.16.2. Déchets de sous-produits de l'industrie.....	18
I.17. Classification des déchets dans le génie civil.....	18
I.17.1. Déchets inertes.....	18
I.17.2. Déchets banals.....	18
I.17.3. Déchets dangereux.....	18
I.18. Description du granulat recyclé.....	19
I.19. Les types des granulats recyclés.....	19
I.20. Propriétés du béton à base des granulats recyclées à l'état frais.....	20
I.20.1. Ouvrabilité.....	20
I.20.2. La masse volumique et la teneur en air.....	20
I.21. Propriétés du béton à base des granulats recyclées à l'état durci.....	20
I.21.1. Perméabilité.....	20
I.21.2. Porosité.....	20
I.21.3. Résistance à la compression.....	20
I.21.4. Résistance à la traction et à la flexion.....	21
I.21.5. Module d'élasticité.....	21
I.22. Propriétés liées à la durabilité.....	21
I.22.1. Retrait et fluage.....	21

I.22.2. Résistance aux cycles de get-dégel.....	21
I.22.3. Carbonatation.....	22
I.23.Conclusion.....	22

Chapitre II : Généralités sur les essais destructifs et non-destructifs

II.1. Introduction.....	23
II.2. Les méthodes d’essai destructif sur le béton.....	23
II.2.1. Essai de compression simple.....	23
II.2.2. Essai de traction par flexion.....	24
II.2.3. Mesure du module élastique.....	24
II.3. Les méthodes d’essais non-destructifs sur le béton.....	25
II.3.1. Essai au Scléromètre.....	25
II.3.1.1. Principe [NF EN 12504-2].....	25
II.3.1.2. Les étapes pour tester le Scléromètre.....	26
II.3.1.3. Les avantages de l’essai Sclérométrique.....	26
II.3.1.4. Les inconvénients de l’essai Sclérométrique.....	27
II.3.1.5. Mesures sur éprouvettes.....	27
II.3.1.6. Exploitation des résultats.....	27
II.3.2. Essai d’auscultation dynamique.....	28
II.3.2.1. Principe [NF EN 12504-4].....	28
II.3.2.2. Détermination de la vitesse de propagation des ondes.....	28
II.3.2.3. Manières de mesure.....	29
II.3.2.4. Les avantages d’essai d’auscultation dynamique.....	29
II.3.2.5. Les inconvénients d’essai d’auscultation dynamique.....	29
II.4. Méthodes combinées.....	30
II.4.1. Principe.....	30
II.4.2. Les avantages des méthodes combinées.....	31
II.4.3. Les inconvénients des méthodes combinées.....	31
II.5. Conclusion.....	31

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

III.1. Introduction.....	32
--------------------------	----

III.2. Matériaux utilisés.....	32
III.3. Caractéristiques des matériaux utilisés.....	32
III.3.1. Caractéristique du sable utilisé	32
III.3.1.1. Caractéristique chimique du sable	32
III.3.1.2. Essai d'analyse granulométrique [NF EN 933-1]	33
III.3.1.3. Caractéristiques physiques du sable utilisé	33
a) Masse spécifique (absolue) [NF EN 1097-7]	34
b) Masse volumique apparente [NF EN 1097-6].	35
c) Porosité et compacité et indice des vides [NF EN 1097-3].....	36
d) Equivalent de sable [NF EN 933-8].	36
e) Teneur en eau [NF P 18-555]	37
III.3.2. Caractéristique du gravier utilisé	38
III.3.2.1. Origine du gravier utilisé	38
III.3.2.2. Analyse granulométrique [NF EN 933-5].....	38
III.3.2.3. Caractéristique physiques des graviers utilisés	39
a) . Masse volumique apparent [NF P 18-554]	39
b) . Masse volumique absolue	40
c) . Compacité, porosité et l'indice de vide [NF EN 1097-4]	40
d) . Teneur en eau du gravier [NF EN 1097-6]	40
III.3.2.4. Caractéristiques mécaniques des graviers utilisés	41
a) . Essai los Angeles [NF EN 1097-2]	41
III.3.3. Caractéristiques du ciment utilisé.....	42
III.3.4. Les adjuvants	43
III.3.5. L'eau de gachage	44
III.3.6. La fumée de silice (FS).....	45
III.3.7. Les fillers utilisé (calcaire).....	46
III.4. Conclusion.....	46

Chapitre IV : Techniques expérimentales

IV.1. Introduction.....	47
IV.2. Formulation du béton autoplaçant.....	47
IV.2.1. Méthode française.....	47
IV.2.2. Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC.....	48
IV.3. Procédure de fabrication des éprouvettes	49

IV.4. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais	50
IV.4.1. Essai d'étalement au cône d'abrams [NF EN 12 350-8].....	50
IV.4.2. Essais de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11]	50
IV.4.3. Essais de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10]	51
IV.5. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci	51
IV.5.1. Essais de compression [NF EN 206-1]	51
IV.5.2. Essais traction par flexion [NF EN P 18-408]	52
IV.5.3. Module d'élasticité	52
IV.5.4. Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NF EN 12398]	52
IV.5.5. Les ultrasons [NF EN 12504-4]	53
IV.6. Confection des éprouvettes.....	53
IV.6.1. Type et tailles des moules	54
IV.6.2. Conservation des éprouvettes	54
IV.7. Conclusion.....	54

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.....	66
V.6.1. L'absorption (A).....	66
V.7. Conclusion	68
Conclusion générale et perspectives.....	69

Références bibliographiques

Liste des tableaux

Chapitre I : Revue général sur le béton autoplaçants

Tab I.1 : Les principales grandeurs caractéristiques de la fumée de silice [15].	15
---	----

Chapitre II : Généralités sur les essais destructifs et non destructifs

Tab II.1 : Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions selon Leslie.	29
---	----

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

Tab III.1 : Les Caractéristiques chimique du sable.	33
Tab III.2 : Analyse granulométrique du sable.	33
Tab III.3 : La masse absolue de sable en (g/cm ³).	34
Tab III.4 : La masse volumique apparente à l'état lâche en (Kg/l).	35
Tab III.5 : La masse volumique à l'état compact du sable en (g/cm ³).	35
Tab III.6 : Porosité, compacité et indice des vides.	36
Tab III.7 : La classification de la nature sable en fonction d'équivalent de sable (E.S).	37
Tab III.8 : Résultats obtenus pour l'équivalent de sable.	37
Tab III.9 : Teneur en eau de sable utilisé.	37
Tab III.10 : Analyse granulométrique du gravier recyclé fraction (3/8).	38
Tab III.11 : Analyse granulométrique du gravier recyclé fraction (8/16).	39
Tab III.12 : Masse volumique apparente du gravier recyclé.	39
Tab III.13 : La masse volumique absolue du gravier recyclé.	40
Tab III.14 : Porosité, compacité et l'indice des vides.	40
Tab III.15 : Teneur en eau des graviers recyclées.	40
Tab III.16 : Caractéristiques mécaniques du gravier recyclé.	41
Tab III.17 : Classification des roches en fonction du coefficient L _A .	41
Tab III.18 : Caractéristiques physiques du (CEM III/A 42.5N-ES-).	42
Tab III.19 : Les compositions chimiques du (CEM III/A 42.5N-ES-).	43
Tab III.20 : Les compositions minéralogiques du (CEM III/A 42.5N –ES-).	43
Tab III.21 : Caractéristique del'adjuvant« MEDAFLOW 30 ».	43
Tab III.22 : Proprétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci.	43

Tab III.23 : Résistance à la compression obtenue par le « MEDAFLOW 30 »	44
Tab III.24 : Caractéristiques chimiques de l'eau	44
Tab III.25 : Caractéristiques chimiques et physique de la fumée de silice.....	45
Tab III.26 : La composition chimique et les propriétés physiques du filler calcaire.....	46

Chapitre IV : Techniques expérimentales

Tab IV.1 : Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode AFGC.....	49
---	-----------

Chapitre V : Resultats et Discussions

Tab V.1 : Caractéristiques rhéologiques des BAP étudiés.. ..	56
Tab V.2 : La résistance à la traction par flexion des BAP étudiés (Rt).....	60
Tab V.3 : La résistance à la compression (R_c) des BAP étudiés à 7, 14 et 28 jours.. ..	61
Tab V.4 : Résultats du module d'élasticité des BAP étudiés.. ..	62
Tab V.5 : Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et Scléromètre (I_s) des BAP étudiés.....	63
Tab V.6 : Résultats de l'absorption capillaire (A) pour les BAP étudiés.. ..	62

Liste des figures

Chapitre I : Revue générale sur le béton autoplçants

Fig I.1 : La différence de la composition entre béton ordinaire et béton autoplçants [3]	4
Fig I.2 : L'effet du superplastifiant sur les grains de ciment.	8
Fig I.3 : Approche générale de formulation des BAP.....	9
Fig I.4 : Résistance en compression d'un BAP par rapport des autres bétons.....	11
Fig I.5 : Retrait spécifique des différents mélanges de bétons [12].	12
Fig I.6 : Les grains de la fumée de silice par (MEB) [14].	13
Fig I.7 : Principe de réaction pouzzolanique (la fumée de silice) [16].	14
Fig I.8 : Combinaison de l'effet pouzzolanique et granulaire de la fumée de silice [16]	15
Fig I.9 : Les différents formes de la fumée de silice [16].	16
Fig I.10 : L'effet de différents dosage de la fumée de silice [15].	17
Fig I.11 : Composition des déchets en chiffres [21]	19
Fig I.12 : Schématisation d'un granulat recyclé [22].	19
Fig I.13 : Différents types des granulats recyclés [17]	19

Chapitre II : Généralités sur les essais destructifs et non destructifs

Fig II.1 : Dispositif pour mesurer la résistance à la compression [23].	23
Fig II.2 : Dispositif pour mesurer la résistance à la traction par flexion.	24
Fig II.3 : Dispositif pour mesurer le module élastique [23].	24
Fig II.4 : L'appareil de scléromètre [24].	25
Fig II.5 : Principe du Scléromètre.	25
Fig II.6 : La résistance probable du béton en fonction de la mesure du recul (linéaire ou angulaire)	26
Fig II.7 : a) Mesure sur surface béton, b) sur éprouvette cubique (10*10*10) cm ³ [19].	27
Fig II.8 : Appareil d'auscultation sonore.	28
Fig II.9 : 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].	30

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

Fig III.1 : Courbe d'analyse granulométrique du sable de Boussada.....	34
Fig III.2 : Principe de l'équivalent de sable.. ..	36
Fig III.3 : Essai équivalent de sable exécuté au laboratoire.. ..	36
Fig III.4: Courbe analyse granulométrique d'un gravier recyclé de deux fraction (3/8, 8/16).....	39
Fig III.5: Appareil de l'essai Los Angeles.. ..	41
Fig III.6: Poudre de la fumée de silice.. ..	45

Chapitre IV : Techniques expérimentales

Fig IV.1: Essai d'étalement par cone d'abrams sur les BAP.....	50
Fig IV.2 : Principe de l'essai stabilité de tamis sur BAP.....	50
Fig V.3 : Boite en L pour le béton autoplaçant.....	51
Fig V.4: Essai compression :a) machine et éprouvette, b) éprouvette destructée.....	52
Fig V.5 : Principe de l'essai traction par flexion.. ..	52
Fig V.6 : Principe de l'essai scléromètre.. ..	53
Fig V.7 : Appareil ultrason.	53
Fig V.9: Type des éprouvettes utilisés :a) prismatique, b) cubique.	54

Chapitre V : Resultats et Discussions

Fig V.1: L'étalement en fonction du type de béton.....	54
Fig V.3: Le taux de remplissage en fonction de type de béton.	57
Fig V.3: L'indice de ségrégation dynamique en fonction du type de BAP (L-box test).	58
Fig V.4: La masse volumique en fonction de types de BAP (état frais).	59
Fig V.5: Evaluation de la résistance à la traction par flexion en fonction du type du béton à 28 jours.....	60
Fig V.6: Evaluation de la résistance à la compression en fonction de l'âge des BAP.	62
Fig V.7: Evaluation du module d'élasticité en fonction du type de BAP à 28 jours.	63
Fig V.8: Evaluation de l'indice sclérométrique en fonction de l'âge pour les BAP étudiés.....	65
Fig V.9: Evaluation de vitesse de propagation des ondes en fonction de type de BAP.....	66
Fig V.10: Evaluation de taux d'absorption (A) des différents BAP étudiés.	67

Notations

H	Hauteur	M₁	Poids de récipient
II	L'indice de ségrégation	C	La compacité en (%)
Rc	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 (%)
Rt	Résistance à la traction en (MPa)	L_A	Coefficient de Los Angles (%)
Is	L'indice sclérométrique	FS	Fumé de silice
D_{max}	Dimension des granulats	FC	Fillers calcaire
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)	Rt	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
Rc	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
ft	Résistance à la traction en (MPa)	I	L'indice hydraulique
Is	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)	Rc	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)	t	Le temps en (μs)



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé

Cette étude a été menée pour répondre à deux préoccupations principales, la possibilité de formuler des BAP à base des matériaux locaux (granulats recyclés) et l'influence du dosage d'une addition de fumée de silice et fillers calcaire sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons autoplaçants.

L'objectif de ce projet de recherche du présent travail est d'optimiser la formulation de ces béton, par le choix approprié du type, la proportion de l'ajout afin d'améliorer les propriétés mécanique du béton autoplaçant en même temps de garder les bonnes propriétés rhéologiques du BAP (capacités de remplissage, de passage et la résistance à la ségrégation) parce que des études antérieures ont montré l'effet de ces additions minérale sur les caractéristiques de ce dernier. En premier lieu, l'effet des additions sur la maniabilité et à rechercher des relations entre les divers essais rhéologiques. La deuxième étape une emphase a été portée sur l'évaluation de la réponse mécanique (traction et compression) des BAP par utilisation de l'essai direct de l'écrasement à coté des essais non destructifs.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la fumée de silice seul ou combiné avec du calcaire à un taux limité améliore la performance d'une façon remarquable des BAP recyclés à base de ces ajouts par rapport à un béton recyclé témoin (sans fillers).

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

Abstract

This study was undertaken to meet two principal needs, the possibility of formulating self compacting concrete (SCC) containing local materials (recycled aggregates). Also, to see the influence of the incorporation of mineral additions (limestone fillers and silica fume) on the rheological and mechanical behavior of the concretes SCC.

The objective of this research work is to optimize the formulation of these concrete, by an appropriate choice of the type, the proportion to be added in order to improve the mechanical properties of SCC mixes. Thus, to keep the good rheological properties of the SCC (fill capabilities, passing and segregation resistance) because studies earlier showed that the mineral additions effect on their characteristics

Firstly, we assess the effect on filler addition percentages on the handling and to look for relationships between various rheological tests. The second step an emphasis was brought on the evaluation of the mechanical response (flexural strength and compression) of the SCC by the use of the direct test next to the non-destructive testing methods (ultrasonic velocity and rebound hammer).

he results obtained showed that that such use of only silica fume or combined with limestone enhanced the performances in a good manner compared to reference concrete without addition, so we can say that a good formulation of SCC concrete based on these additions could be possible.

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

ملخص

هذه الدراسة تعتمد على شيتين اساسيين هما امكانية وضع خرسانة ممزوجة انطلاقا من مواد محلية مثلا (حصى مستعملة) وتأثير الاضافات المعدنية (غبار السيلس' و غبار الكلس) على الخصائص الريولوجية والميكانيكية لخرسانة ذاتية الوضع.

الهدف من هذا الدراسة هو استخراج النوع والنسبة المناسبة لتحسين الخصائص الميكانيكية للخرسانة ذاتية الوضع في نفس الوقت نحافظ على الخصائص الريولوجية للخرسانة (القدرة على المرور' المقاومة ضد الفصل) لان الدراسات السابقة اثبتت ان الاضافات المعدنية تؤثر على هذه الخصائص.

وفي المرحلة الاولى نقيم تأثير الاضافات على قوام الخرسانة ونبحث على العلاقة بين مختلف التجارب الريولوجية.

المرحلة الثانية تعتمد على تقييم الاستجابة الميكانيكية في (الشد و الضغط) للخرسانة ذاتية الوضع وذلك باستعمال تجارب الاتلاف و مقارنتها مع التجارب الغير اتلافية.

النتائج المتحصل عليها من خلال استعمال غبار السلسيوم سواء وحده او ممزوج بالخلط مع غبار الكلس قد حسن من اداء الخرسانة بشكل ملحوظ مم يمكننا القول اننا حصلنا على خليط مناسب لهذا النوع من الخرسانة.

المفاتيح : خرسانة ذاتية الوضع' غبار السيلس' غبار الكلس' حصى مستعملة' الخصائص الريولوجية' المقاومة

الميكانيكية

Introduction générale

Introduction générale

I.1. Introduction:

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Environ 4 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés tous les ans de par le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures, notamment des bâtiments, d'immeubles d'habitation, de ponts, de routes, de tunnels, d'aéroports, de barrages, de ports, de centrales thermiques et nucléaires et de plates-formes offshore,...etc.

Ce matériau composite résultant du mélange judicieusement dosé d'un squelette granulaire (granulats) et d'une matrice pâteuse durcissable composé de ciment d'eau et le plus souvent d'adjuvants.

Il est alors évident que la conception correcte d'un ouvrage quel qu'il soit requiert : la connaissance des propriétés des matériaux utilisés. Le calcul de dimensionnement des pièces. Cette connaissance des propriétés des matériaux implique que la constitution de ceux-ci doit être connue en premier lieu. L'utilisation massive de quantités énormes dans l'industrie de fabrication du béton pousse les spécialistes du génie civil à songer à une solution alternative comme le cas d'un béton à base d'agrégats recyclés qui peut présenter une solution pour réduire l'impact sur l'environnement et économiser les ressources de granulats naturels. Cet usage engendre l'utilisation de certains des additions minérales (fillers de calcaire, fumée de silice). Ceci, peut être combiné avec les adjuvants ; notamment les superplastifiants afin de surmonter certains inconvénients en matière de résistance ou de durabilité de ces produits dites bétons recyclés adjuvantés. En finalité, la formulation d'un béton innovants alternatif qui répond aux exigences d'un béton autoplaçant (BAP), ayant des performances acceptables en terme de rhéologie à l'état frais (bonne fluidité, facilité de coulage et sans ségrégation) ainsi qu'à l'état durci bonne résistance mécanique et meilleure durablilté.

I.2. Problématique :

Les agrégats récupérés d'ancien béton peuvent provoquer la chute de résistance d'un béton autoplaçant recyclé en comparaison avec un béton autoplaçant ordinaire; du fait de la nature des granulats recyclés de qualité inférieure. Cependant, cet handicap peut être surmonté par l'usage d'autres additions (fillers de calcaire et la fumée de silice) en combinaison avec les adjuvants superplastifiants pour améliorer certaines propriétés de ce béton autoplaçant recyclé En finalité, la formulation d'un béton innovants qui répond aux exigences d'un béton autoplaçant (BAP),

ayant des performances acceptables en terme de rhéologie à l'état frais ; bonne fluidité, sans ségrégation ainsi qu'à l'état durci bonne résistance mécanique et durable.

Cette étude vise l'investigation de l'effet de l'addition minérale fumée de silice avec les fillers de calcaire avec différents dosages (0 %, 2.5 %, 5 % et 10%) sur les propriétés physico- mécaniques d'un béton autoplaçant recyclé comparé à un béton témoin confectionné avec des agrégats recyclés seuls (sans addition). Cette étude utilise les essais destructifs et les essais non destructifs [ultra son (V) et scléromètre (Is)] comme moyens d'évaluation des performances mécaniques du dit béton autoplaçant recyclé.

I.3. Objectifs de l'étude :

L'objectif principal de ce travail consiste à étudier l'influence de l'addition (fillers de calcaire et fumée de silice) sur le comportement d'un béton autoplaçant recyclé.

L'adjuvant superplastifiant à un dosage fixé à 2 % est combiné avec différents dosages de l'addition (calcaire et fumée de silice) à un taux maximal de 10 % sur les propriétés physico-mécaniques d'un BAP recyclé et un béton témoin confectionné avec des agrégats recyclés seuls (sans addition).

Elle a pour but :

- ❖ Voir l'effet de la fumée de silice et le calcaire sur la réponse mécanique d'un béton recyclée.
- ❖ Voir l'effet combiné sur les caractéristiques rhéologiques et physiques à l'état frais et durci dans le cas d' un béton autoplaçant recyclé.
- ❖ Valorisation des déchets telque les fillers de calcaire ou fumée de silice.
- ❖ Enfin, étude de comparaison de cette composition de BAP avec additions par apport à un béton témoin (sans ajout).

I.4. Aperçu sur le mémoire :

Ce mémoire est composé de cinq chapitres qui sont les suivant :

- ❖ **Introduction générale** : Problématique et Objectifs.
- ❖ **Chapitre I** : Revue générale sur le béton autoplaçant : consiste à donner une idée générale sur l'apparition, la définition et le domaine d'application du béton autoplaçant.
- ❖ **Chapitre II** : Notions généralités sur les essais destructifs et non destructifs.
- ❖ **Chapitre III** : Caractérisation des matériaux utilisés.

Matériaux, matériels et essais : donne une idée sur les essais utilisés pour la caractérisation physiques, chimique et mécaniques des matériaux, ainsi que sur les matériels utilisés pour ces essais.

- ❖ **Chapitre IV** : Techniques Expérimentales.
- ❖ **Chapitre V** : Résultats et discussion, présente les résultats expérimentaux obtenus et interprétations faites.
- ❖ **Conclusion générale** : On présente les principales conclusions tirées à partir résultats obtenus lors de cette étude ainsi que les futures perspectives.

Chapitre I

Revue générale sur le béton autoplaçant

Revue générale sur le béton autoplaçant

Ce chapitre est composé de trois parties essentielles

- ❖ La première partie est : généralité sur le béton autoplaçant.
- ❖ La deuxième partie est : l'effet de la fumée de silice sur le béton autoplaçant.
- ❖ La troisième partie est : généralité sur les bétons recyclés.

A. Généralité sur le béton autoplaçant :

I.1. Introduction :

L'utilisation des différents types de bétons innovants a créé une compétition entre eux et spécialement le béton Autoplaçants. Par définition les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique que : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité). La mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une grande fluidité du matériau, mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité, obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiants et de fines et/ou l'emploi d'agents de viscosité [1].

ces bétons présentent les propriétés suivantes [2] :

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

I.2. 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).

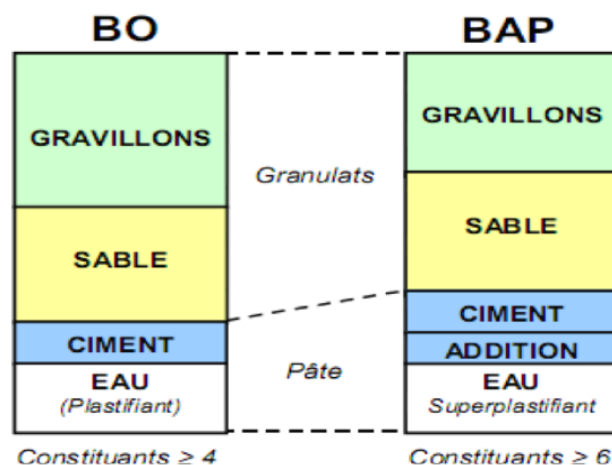


Fig. I.1 : La différence de la composition entre Béton Ordinaire et Béton Autoplaçant [3].

I.2.1. Le ciment :

Le ciment conforme à la norme **NF EN 197-1**, appelé ciment **CEM**, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment [4].

constitué principalement de clinker portland (K) qui est un matériau hydraulique, il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20% [5]. Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont [6]:

- ❖ Le silicate tricalcique, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$, que l'on écrit C_3S .
- ❖ Le silicate bicalcique, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$, que l'on écrit C_2S .
- ❖ L'aluminate tricalcique, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$, que l'on écrit C_3A .
- ❖ L'aluminoferrite tetracalcique, $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3 .\text{Fe}_2\text{O}_3$, que l'on écrit C_4AF .

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de **BAP**. Cependant, l'utilisation du ciment portland (c'est-à-dire **CPA-CEM I 42,5** qui contient au moins **95 %** de clinker), nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales [3].

I.2.2. 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 [7].

Les granulats roulés ou concassés (**Fig.I.2**) 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.2.3. 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.2.4. 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, fumée de silice...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.2.4.1. Différents types d'additions minérales :**I.2.4.1.1. Fillers (calcaire et siliceux) :**

Ce sont des poudres de roche (calcaire ou siliceuse) obtenues par broyage, dont les caractéristiques sont définies par la norme [NF EN P 18-508]. La demande en eau de fines siliceuses telles que le quartz est supérieure à celle des fillers calcaires d'usage plus courant dans les bétons. Ceci est dû à la forme anguleuse des particules de quartz. Des études sur les fillers calcaires ont montré qu'ils présentent une certaine activité physico-chimique, qui favorise l'accélération de l'hydratation du clinker. D'après les mêmes études, le calcaire réagit avec les aluminates du ciment pour former des carboaluminates de calcium hydratés, qui sont favorables à la durabilité du matériau. À long terme, les fillers calcaires présentent de bonnes caractéristiques de régularité à la production. D'autre part, leur couleur généralement claire [13].

I.2.4.1.2. Laitier granulé de hauts fourneaux :

Les minerais de fer sont utilisés pour la fabrication de la fonte ; en plus de leurs phases ferreuses, ces minerais contiennent aussi des minéraux proches de ceux du cru du clinker. Lors du processus de fusion du minerai dans les hauts fourneaux à une température allant de 1135 à 1350°C, se produit la séparation gravitaire, le laitier à une température avoisinant celle de la fusion, est refroidi brusquement à l'eau (trempe) et le laitier prend l'appellation de laitier granulé défini par la norme [NF EN 15167-1]. La vitrification du laitier granulé par la trempe confère au matériau son pouvoir hydraulique latent. Un broyage fin du laitier lui permet d'être utilisé comme addition dans les ciments et les bétons [13].

I.2.4.1.3. Fumée de silice :

Il s'agit d'un sous-produit de la fabrication du silicium métal et de ses alliages, la fumée de silice obéit à la norme [NF EN 13263-1]. Elle se caractérise par un diamètre des particules sphériques ultra fines (entre 0,01µm) et par une teneur en silice amorphe de plus de 90%. L'emploi de la fumée de silice doit se faire conjointement avec un fluidifiant du type superplastifiant afin de remédier à l'agglomération causée par sa finesse. Une bonne dispersion, permet aux particules de la fumée de silice de se placer entre les interstices des grains de ciment, diminuant ainsi la quantité d'eau nécessaire au mélange. L'utilisation de la fumée de silice conduit à des bétons extrêmement compacts à caractéristiques mécaniques élevées et une résistance nettement renforcée vis-à-vis des milieux agressifs [13].

I.2.5. Adjuvants (superplastifiants) :

L'action principale des superplastifiants est de flocculer les grains de ciment (**Fig I.2**), une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues, l'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles [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].

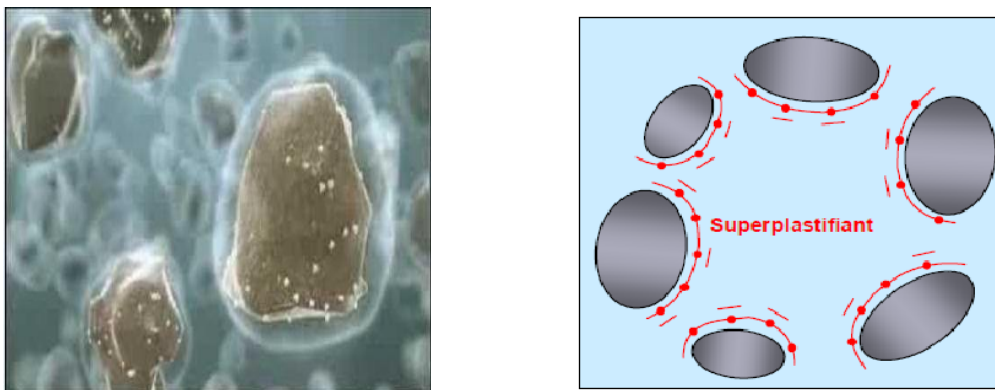


Fig.I.2: L'effet du superplastifiant sur les grains de ciment.

I.3. 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.3.1. Approches de formulation :

Les recherches entreprises recensées dans la littérature se basent essentiellement sur des approches diphasiques du matériau (Fig I.3). 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 autoplaçant. 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.

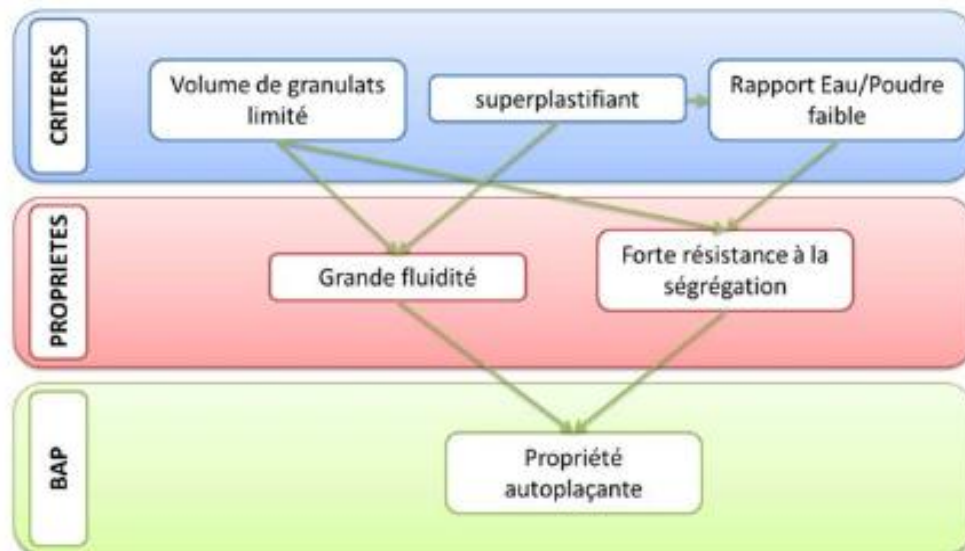


Fig.I.3 : approche générale de formulation des BAP.

I.4. Caractérisation des bétons Autoplaçants :

I.4.1. Caractérisation des bétons Autoplaçants à l'état frais :

I.4.1.1. 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.4.1.2. 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.4.1.3. Essai de stabilité au tamis:

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants 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.4.2. 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.4.2.1. 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.4**) [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].

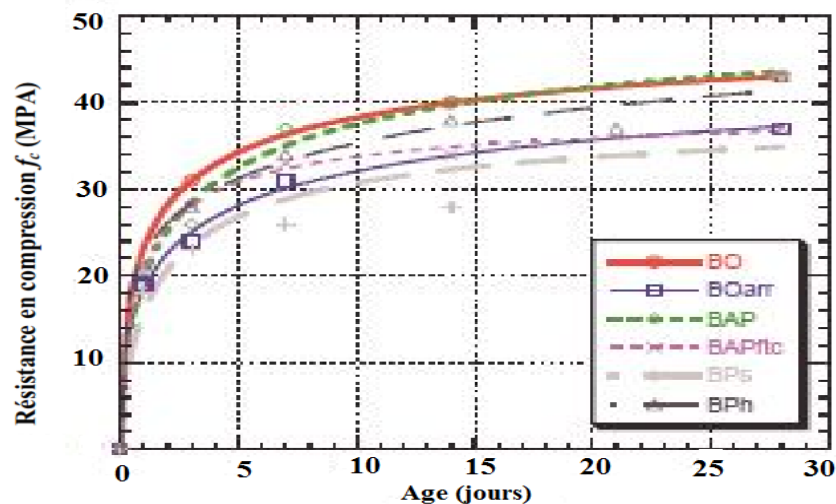


Fig I.4 : Résistance en compression d'un BAP par rapport des autres bétons.

I.4.2.2. 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 situé entre 2 et 8% [3].

I.4.2.3. Retrait :

Les bétons vibrés ont un retrait endogène plus élevé que les BAP (les résultats donnent des valeurs entre 50 et 200 $\mu\text{m}/\text{m}$) (**Figure I.5**). 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].

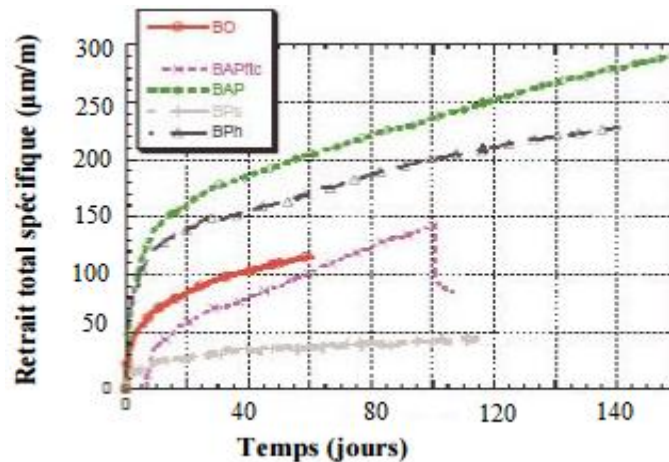


Figure I.5 : Retrait spécifique des différents mélanges de bétons [12].

I.5. Propriétés physico-chimique et durabilité d'un BAP :

I.5.1. 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.5.2. 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.6. 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.7. Avantages et inconvénients d'un béton autoplaçant :

I.7.1. 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.7.2. 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. l'effet de la fumée de silice sur le béton autoplaçant

I.8. Effet de la fumée de silice sur le BAP :

Introduction :

Grace à sa surface spécifique et sa grande finesse, la fumée de silice permet d'obtenir des bétons plus denses avec une porosité très fine, plus imperméables et donc plus durables. A cet effet, et afin d'améliorer les performances de notre béton, on a pensé à introduire de la fumée de silice comme ajout qui représenté une couleur gris clair (**Fig I.6**), ou elle joue le rôle de filler. [14]

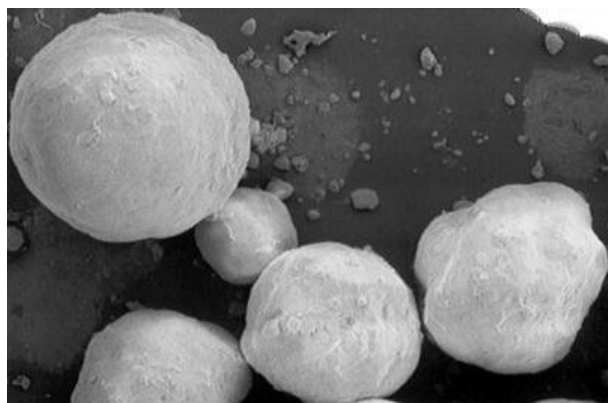


Fig I.6 : Les grains de la fumée de silice par (MEB) [14].

I.9. Mode d'action de la fumée de silice :

Comme les cendres volantes, les fumées de silice ont une réaction pouzzolanique. Elles réagissent avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment et se transforment en silicate de calcium hydraté (CSH), mais en raison de leur grande finesse et de leur teneur élevée en SiO_2 , elles sont beaucoup plus réactives. Cela se manifeste par exemple par le fait que si l'on utilise de la fumée de silice comme ajout ou pour remplacer une partie du ciment, la chaleur d'hydratation d'un béton augmente pendant les trois premiers jours. L'augmentation considérable de la résistance et la durabilité des bétons contenant de la fumée de silice par rapport aux bétons sans ajout s'explique généralement par une plus fine répartition des pores [15].

I.9.1. L'effet pouzzolanique :

La fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte. Sa finesse et ses propriétés pouzzolanique confèrent à la fumée de silice une forte réactivité avec les Ca(OH)_2 produits durant l'hydratation du béton (Fig I.7) :



Sa haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton avec un indice d'activité à 28 jours supérieure 100% [16].

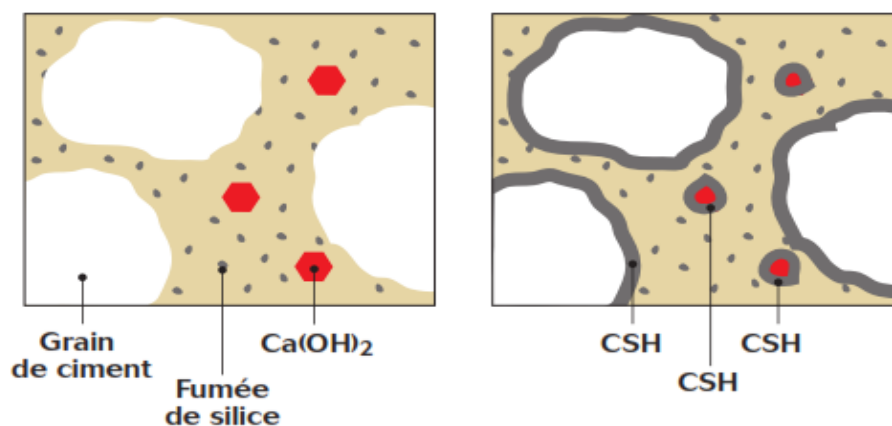


Fig I.7 : Principe de réaction pouzzolanique (la fumée de silice) [16].

I.9.2. L'effet granulaire :

La fumée de silice est 100 à 150 fois plus fine qu'une particule de ciment et peut remplir les vides interstitiels entre les fines et les grains de ciment. Cet empilement granulaire optimal contribue ainsi à réduire fortement la porosité et la perméabilité du béton (Figure I.8) [16].

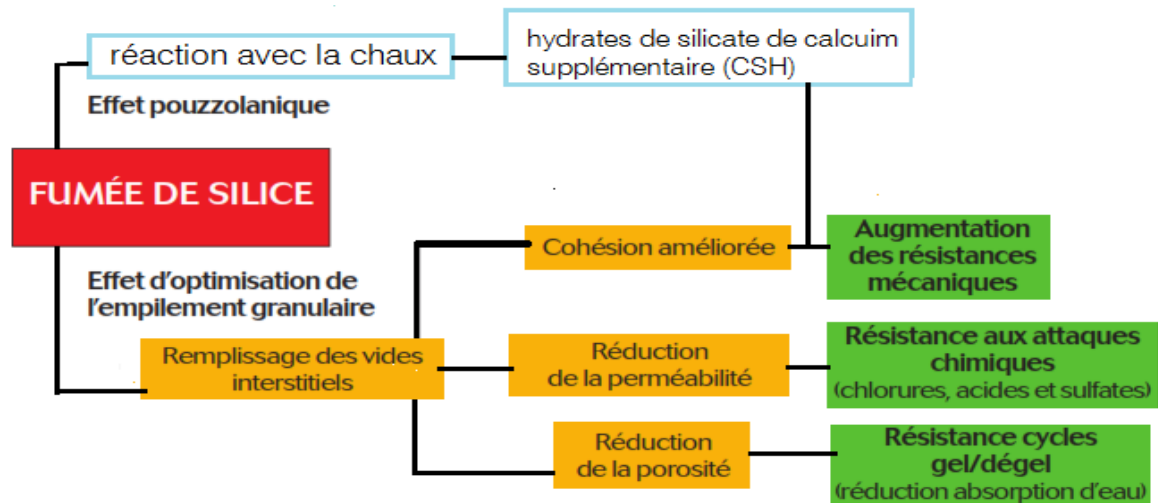


Figure I.8 : Combinaison de l'effet pouzzolanique et granulaire de la fumée de silice [16].

I.10. Caractéristiques des fumées de silice :

Les principales caractéristiques sont représentées dans le (Tableau.I.1) selon la norme NF EN 13263-1 [15] :

Tableau I.1. Les principales grandeurs caractéristiques de la fumée de silice [15].

Teneur en SiO ₂ [%]	Teneur en CaO [%]	Teneur en Al ₂ O ₃ [%]	Densité [Kg/dm ³]	Surface spécifique [m ² /g]	Densité apparente [Kg/dm ³]	Grandeur moyenne particules [µm]	Perte au feu [%]
85 – 95	0,1 - 5	0,2 - 3	2,1 – 2,2	15 – 25 (BET)	0,2 – 0,3	0,1 – 0,2	0,7 – 4

I.11. Les formes de la fumée de silice :

- ❖ **Poudre non-densifiée**, d'une densité apparente d'environ 200 Kg/m³, pratiquement pas manipulable sur les chantiers.
- ❖ **Poudre densifiée**, d'une densité apparente d'environ 500 Kg/m³, sa manipulation ne pose pas de problème, mais la durée du malaxage doit être prolongée afin que l'ajout soit réparti uniformément (Figure I.9).
- ❖ **Suspension aqueuse (coulis)**, avec environ 50% de matières solides de densité apparente à 1400 Kg/m³, sensible au gel doit être remuée pour rester homogène et stable.



Figure I.9 : Les différents formes du fumée de silice [16].

I.12. Dosage de la fumée de silice dans le béton :

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

I.13. Rôle de la fumée de silice dans le béton frais :

Chaque Kg de fumée de silice fixe environ 1 Kg d'eau de gâchage sous forme de couche mince sur la surface. Les particules de fumées de silice mouillées adhèrent aux particules de ciment, lesquelles sont de ce fait réparties uniformément. Elles remplacent également une partie de l'eau interstitielle. Il en résulte une pâte de ciment durcie de structure plus régulière. On peut ajoutant des superplastifiants, un béton frais de cette composition témoigne d'une bonne pompabilité et même de consistance plastique au ressuage ni à la ségrégation [15].

I.14. Rôle de la fumée de silice dans le béton durci :

Deux des propriétés des bétons contenant des fumées de silice sont particulièrement intéressantes : la faible perméabilité et la résistance élevée. C'est entre le 3^{ème} et les 28 jours que les fumées de silice apportent la principale contribution à la résistance. Qui à été généralement pareille ou supérieure à celle des bétons sans ajout, indépendamment de l'utilisation des fumées de silice comme substitut du ciment ou comme ajout, sont aussi augment la résistance à la (compression, traction et flexion) (Fig I.10). Et même le module d'élasticité les BAP résistance en particulier sont sensibles à la rupture de fragilité et peuvent de ce fait se rompre soudainement sans déformation notable au préalable. Bien que la porosité globale reste à peu près la même, la perméabilité des bétons contenant du fumée de silice est frottement réduite, car il y a moins de gros pores dans la pâte de ciment durcie. On a par exemple mesuré dans des bétons avec 300 Kg de ciment et 0% et 5% de fumée de silice des coefficients de perméabilité à l'eau respectivement

3×10^{-11} et 6×10^{-14} m/s. La réduction de la perméabilité et la conductivité moindre favorisent la protection contre la corrosion [15].

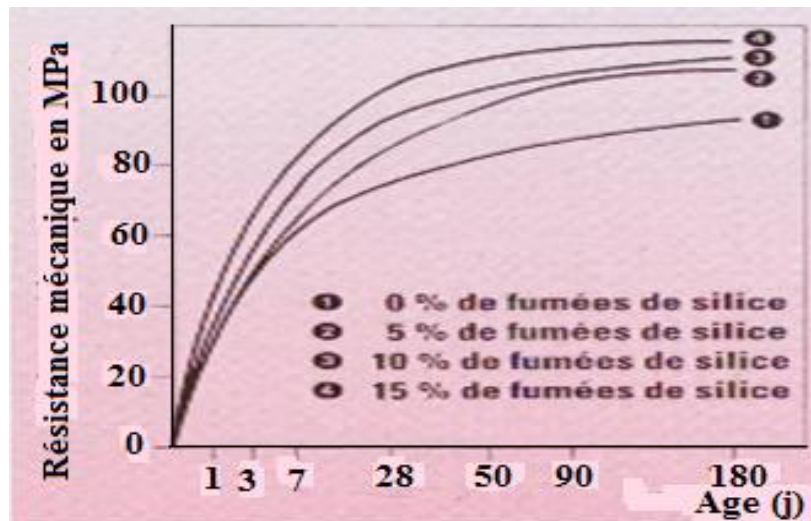


Figure I.10 : L'effet de différents dosages du fumée de silice [15].

I.15. Avantages de la fumée de la silice :

I.15.1. Sur la maniabilité et durabilité [16] :

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

I.15.2. Sur la Performances mécaniques [16] :

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

C. Généralité sur les bétons recyclés.

Introduction :

L'augmentation des déchets provenant de la construction et de la démolition, ainsi que l'extraction étendue des ressources naturelles nécessaires à la production des matériaux de construction. L'idée de recycler les bétons est apparue dans le but principal de préserver l'environnement. En effet, la réutilisation des bétons en tant que granulats dans des nouvelles

compositions de béton a permis de réduire les dépenses sur la gestion des déchets de construction. [17, 18] Pour but de [19] :

- ❖ des diminutions importantes d'émissions de gaz (CO₂).
- ❖ la réduction de la consommation énergétique.
- ❖ la protection des ressources naturelles dont l'accès devient de plus en plus rare.
- ❖ la valorisation de ces matériaux pour limiter et éliminer les mises en décharge.

I.16. Sources de Déchets Utilisés en Génie Civil :

Le terme « **déchet** » est un : « résidus, matériaux, substances ou débris rejetés à la suite d'un processus de production, de fabrication et d'utilisation ». En génie civil deux principales sources de production de déchets qu'on rencontre généralement par la suite :

I.16.1. Déchets de construction et de démolition :

Sont lourds et volumineux, généralement classés parmi les déchets industriels. Produisent dans la construction tel que : béton, briques, pierre de taille, bois...etc, ces tas sont plus ou moins composite suivant la nature et l'âge des ouvrages [20].

I.16.2. Déchets de sous-produits de l'industrie :

L'utilisation des déchets industriels, a une importance pratique et économique immédiate, car de nombreux produits secondaires et déchets résiduels peuvent remplacer des matières premières naturelles. Parmi les sous-produits utilisés tel que (les laitiers de haut fourneau, cendre volante, terre cuite...etc.) [20].

I.17. Classification des déchets dans le génie civil :

I.17.1. Déchets inertes:

Sont les plus stables, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique. Exemple : (brique, tuiles et céramique, granulats non pollués) [20].

I.17.2. Déchets banals :

Sont non inertes et non dangereux générés par les activités du commerce, de l'industrie. Comme (cartons, papiers, plastiques, plâtre...etc) [20].

I.17.3. Déchets dangereux :

Sont présentent un caractère polluant ou toxique et nécessitent d'être éliminés dans une filière spécifique. Exemple : (pots de peinture, tubes de colle, néons...etc) [20].

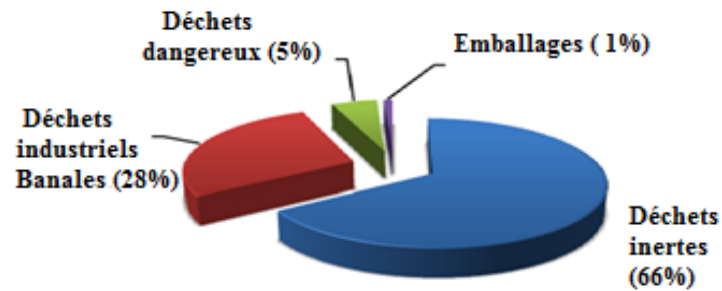


Figure I.11 : Représentation en chiffres des déchets [21].

I.18. Description du granulat recyclé :

Un granulat provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux « granulats naturels » provenant de carrières ou de sablières. Sont formés du granulat d'origine et de mortier attaché à celui-ci (**Figure I.12**). Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système composé de deux phases distinctes. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé [22].

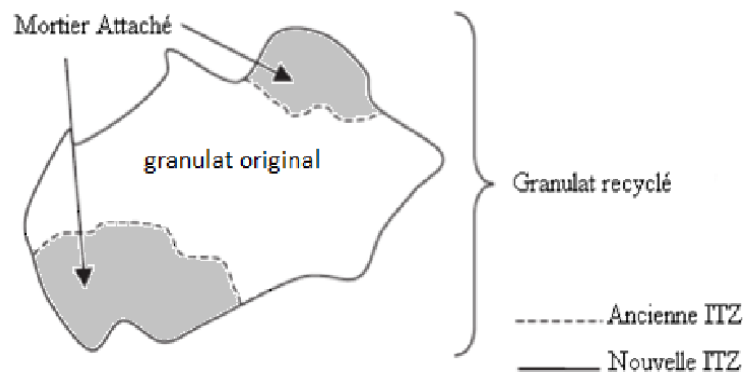


Figure I.12 : Schématisation d'un granulat recyclé [22].

I.19. Les type des granulats recyclés :

En règle générale, on distingue quatre classes principales de granulats recyclés (**Figure I.13**) [17].

1. Granulats de débris de béton.
2. Granulats de débris de maçonneries.
3. Granulats de débris hydrocarbonés.
4. Granulats de débris mixtes



Figure I.13 : Différents type des granulats recyclés [17].

I.20. Propriétés du béton à base des granulats recyclés à l'état frais :**I.20.1. Ouvrabilité :**

L'utilisation des granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton de granulats naturels pour un même rapport E/C. Cette baisse d'affaissement serait due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. En effet, on observe une augmentation de **3,1 à 9,4 %** de la demande en eau du béton lors de l'utilisation des granulats recyclés, pour garantir un même affaissement. Ceci a été attribué aux granulats recyclés ayant une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton [22].

I.20.2. La masse volumique et la teneur en air :

La masse volumique apparente du béton frais à base de granulats naturels est dans la plage de **2400 kg/m³**, alors que le béton à base de granulats recyclés est nettement plus léger, **2150 kg/m³**, quel que soit le type de ciment. Et la teneur en air du béton de granulats recyclés est légèrement supérieure (**4% à 5,5%**) par rapport au béton à base des granulats **100%** naturel [20].

I.21. Propriétés du béton à base des granulats recyclés à l'état durci :**I.21.1. Perméabilité :**

Elle est augmentée avec le taux de remplacement du granulats. Cette augmentation est principalement due à l'absorption d'eau des granulats recyclés. Cette augmentation n'a cependant pas été observée pour un taux de remplacement de **20%** selon certains travaux. [22]

I.21.2. Porosité :

Généralement corrélée à leur capacité d'absorption et le volume de pores et la distribution. Du fait de la présence de mortier attaché aux granulats, la structure des bétons recyclés est plus poreuse qu'un béton ordinaire. Les valeurs de porosité obtenues dans la littérature vont de **14% à 20,1%**. [22]

I.21.3. Résistance à la compression :

En général, c'est entre **5% à 30%** de diminution dans la résistance à la compression du béton fait de gros agrégats recyclés, en fonction de la qualité du béton et la composition du mélange. [Rao, 2005] a trouvé la résistance du béton à base de granulats recyclés et le béton de référence à comparable avec un remplacement à **100%**, à condition que le rapport E/C est supérieur à **0,55**. [19][Poon et al] ont également observé que des granulats recyclés ont une forme plus anguleuse et une texture de surface rugueuse par rapport aux granulats naturels qui peuvent conduire à une meilleure liaison et résistance.[Corinaldesi et Moriconi]ont étudié l'effet des fumées de silice sur l'amélioration de résistance à la compression du **BGR**. Ils ont observé que la force peut être

améliorée pour égaler ou voire dépasser celle du béton de granulats normaux en ajoutant des fumées de silice dans le mélange. [22]

I.21.4. Résistance à la traction et à la flexion :

La résistance à la traction des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certaines ont montré une réduction de **15 à 20%** à un taux de remplacement de **100%** et d'autres une perte de moins de **10%** pour un essai réalisé à 28 jours. [22]

I.21.5. Module d'élasticité :

Le module d'élasticité représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte-déformation. Les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité sont la teneur en mortier résiduel, le rapport E/C et la teneur en air entraînée. Le module d'élasticité d'un **BGR** fabriqué à partir de fins et gros granulats est d'environ **25% à 40%** de moins que celui du béton ordinaire, tandis que pour un béton fait avec de gros granulats seulement, il est d'environ **10% à 33%** de moins, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats. Cette perte de module d'élasticité semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés [22].

I.22. Propriétés liées à la durabilité :

I.22.1. Retrait et fluage :

Le retrait est une mesure du changement volumétrique du béton libre de chargement extérieur. Le béton se dilate avec l'accroissement de la teneur en eau et se contracte avec la perte d'humidité. D'après les études les propriétés de retrait endogène et de séchage du béton contenant des granulats de béton recyclé, il indique que le taux de retrait est élevé aux jeunes âges, puis ralentit avec le temps. Les facteurs de remplacement des granulats de béton recyclé par des granulats naturel supérieur à **30%** provoquent une augmentation rapide dans les valeurs de retrait de séchage et indiquée une déformation moyenne de **0.007 mm/m** par contre un taux de remplacement supérieur à **60%** indique une déformation de l'ordre **0.05 mm/m**. [Ravindrarajah et Tam] ont montré que le fluage du **BGR** est d'environ **30% à 60%** plus élevé que celui du béton ordinaire. Donc le fluage du béton est proportionnel à la teneur en pâte ou de mortier dans le béton [22].

I.22.2. Résistance aux cycles de gel-dégel :

Est une caractéristique importante pour les bétons extérieurs dans un environnement humide. Elle est liée à plusieurs autres propriétés du béton, notamment sa porosité, sa perméabilité et la structure de ses pores. On étudie cette propriété en mesurant la perte de masse du béton après un

nombre de cycles de gel-dégel selon les spécifications de la norme [ASTM C666]. Que les bétons contenant des granulats recyclés sont plus résistants que les bétons témoins. Le béton contenant des granulats recyclés est beaucoup plus durable (différence de **68%** au niveau de la perte de masse observée) [22].

I.22.3. Carbonatation :

Le gaz carbonique de l'air réagit avec le béton durci causant un certain retrait. La carbonatation ne détruit pas le béton, mais peut réduire le pH du béton. L'utilisation de granulats recyclés avec des rapports E/C très élevé, a peu d'impact significatif sur la résistance à la carbonatation du béton. La profondeur de carbonatation diminue avec le remplacement du granulats naturel par un granulats recyclés à résistance à la compression constante. Cette diminution plus grande pour des taux de remplacement de **20** et **50%** que pour un taux de remplacement de **100%**. La meilleure performance des bétons contenant des granulats recyclés peut être expliquée par le fait que ceux-ci ont un contenu en ciment plus élevé [22.]

I.23. Conclusion :

Cette 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 les fumées de silice et leur influence sur les bétons spécialement le BAP, que L'incorporation de fumée de silice conduit à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons. Pour les bétons frais, la fumée de silice complète le fuseau granulaire et supprime les tendances au ressuage ou à la ségrégation tout en réduisant les chaleurs d'hydratation. Pour les bétons durcis, la finesse de la fumée de silice permet de créer une microstructure très dense à caractéristiques mécaniques élevées en réduisant les teneurs en eau grâce à l'adjuvantation. Ces bétons ont ainsi une résistance nettement renforcée vis-à-vis des agents ou des phénomènes agressifs.

La partie troisième basée sur l'utilisation des granulats recyclés dans le secteur de la construction en génie civil à partir de l'application de principe de recyclage et la valorisation pour réduire l'impact environnemental des déchets de béton. A condition que ce type des granulats respectent les normes et les réglementations strictes pour garantissant la connaissance qualitative performante des produits.

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 importante caractéristique de ce type des essais est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements 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 cylindriques et cubiques de dimensions (**16x 32 cm²**) et (**10 x 10 x 10 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 cylindres et des cubes est une presse hydraulique dont la capacité maximale est de **1500kN** en compression. L'expression des résultats sera donnée par la relation **R_c=F/S** (en MPa) où **F** est la charge maximale et **S** la surface de compression de l'éprouvette [23].



Figure II.1 : Dispositif pour mesurer la résistance à la compression [23].

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.2.3. Mesure du module élastique :

On détermine à **28** jours sur des éprouvettes cylindriques de (16 x 32) cm² mûries à l'eau (**Figure II.3**), équipées d'extensomètre axial d'un seul capteur permettant de mesurer les déformations longitudinales sous des chargements croissants jusqu'à une contrainte maximale égale à : **σ_c = 0.6*σ_c**. A partir de l'équation **σ_c = E_c*ε_c** [23].



Fig.II.3 : Dispositif pour mesurer le module élastique [23].

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

II.3.1. Essai au scléromètre :

C'est la méthode de dureté superficielle qui consiste essentiellement à une auscultation du béton par une manière standard (Figure II.4), en utilisant une masse donnée activée par une certaine énergie puis mesurer ensuite le rebondissement [24].



Fig II.4 : 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.5).

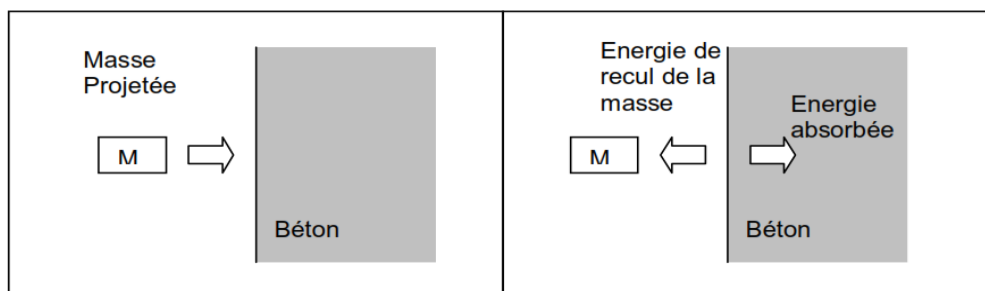


Figure II.5 : Principe du Scléromètre.

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 à 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 indice moyens.
- 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 III.6) [24]:

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

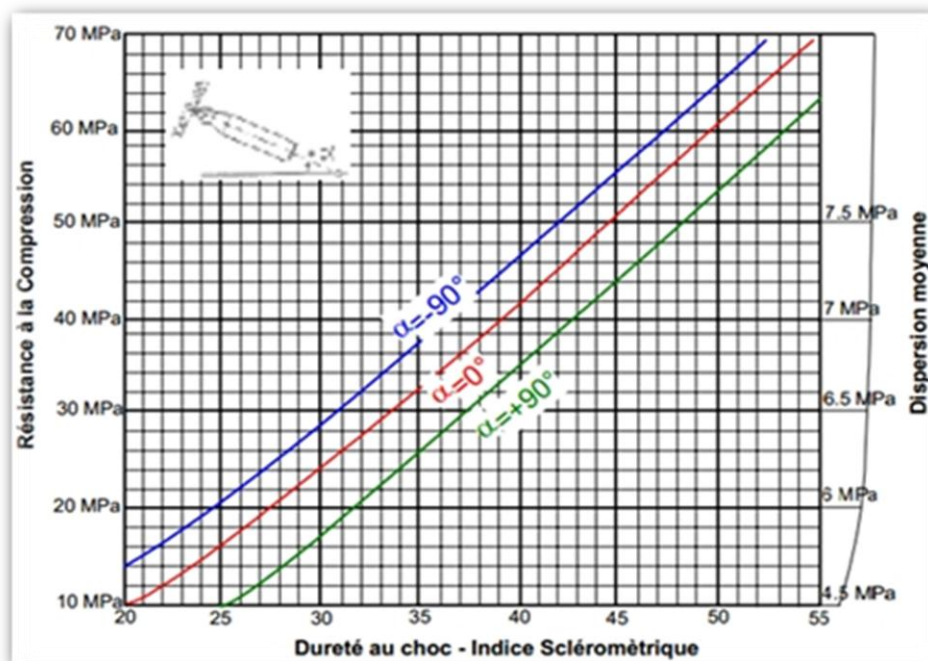


Fig II.6 : La résistance probable du béton en fonction de la mesure du recul (linéaire ou angulaire).

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 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.3.1.5. Mesures sur éprouvettes :

Les éprouvettes doivent être de forme cylindrique ou cubique (Fig II.7), 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.7 : 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.Gabrysak** [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.8) [24].



Fig II.8 : Appareil d'auscultation sonore.

II.3.2.1. 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	Excellente	Bonne	Douteuse	Mauvaise	Très mauvaise
Vitesse de propagation m/s	Supérieure à 4000	3200-4000	2500-3200	1700-2500	Inférieure à 1700

II.3.2.3. 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.4.1. Principe :

Déterminer la résistance en compression du béton à partir des abaques donnant (**Fig II.9**) 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].

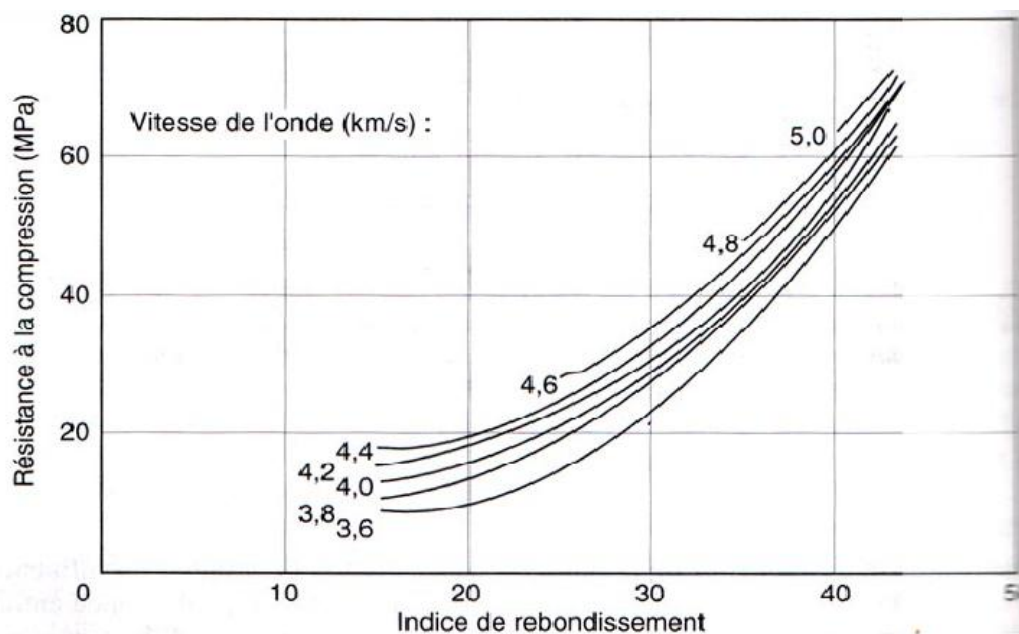


Fig II.9: Courbe d'estimation de la résistance in situ par utilisation conjointe de la mesure de propagation d'ondes ultrasoniques et les résultats sclérométrique selon [Bellander, 1977] [19].

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 non destructifs 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 différents constituants entrant dans la composition d'un béton autoplaçant tel que : (granulats, ciment, addition minérales, adjuvants et eau). Ainsi que leurs caractéristiques essentielles de chaque composant avec une description détaillée des modes opératoire pour chaque essai. Ces essais sont réalisés au niveau du laboratoire de génie civil à l'université Mohamed Boudiaf à M'sila.

III.2. Matériaux utilisés :

Dans cette partie, nous avons décrit les différents constituants entrant dans la composition d'un béton autoplaçant tel que : (granulats, ciment, addition minérales, adjuvants et eau):

- ❖ Le sable à l'origine siliceux provenant de Oued Maiter de Boussaâda, M'sila.
- ❖ Deux fractions de gravier recyclées (3/8, 8/16) l'origine de démolition des éprouvettes.
- ❖ Ciment de type (résistant aux sulfats **CEM III/A 42.5N-ES-**) provenant de la cimenterie Ain El-Kebira à Sétif.
- ❖ **L'adjuvant:** « **MEDAFFLOW 30** », un superplastifiant provenant la société de Granitex Oued-Smar à Alger.
- ❖ **L'ajout 1:** le filler (farine de calcaire FC de fraction < à **0,08mm** (carrière Bourahli route de Bordj Bou Arreridj)).
- ❖ **L'ajout 2:** le filler (la fumée de silice FS de fraction < à **0,08mm**), Granitex, 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 sable utilisé :

III.3.1.1. 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.1**).

Tableau III.1 : Les Caractéristiques chimiques du sable.

Eléments	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.3.1.2. Essai d'analyse granulométrique [NF EN 933-1] :

Selon la norme indiquée, les résultats obtenus sont représentés dans le (Tableau.IV.2) suivant :
que M = 2kg

Tableau III.2 : Analyse granulométrique du sable.

Tamis(mm)	Refus partiel(g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2,5	10	10	0.50	99.50
1,25	112	122	6.10	93.90
0,63	240	362	18.10	81.90
0,315	681	1043	52.15	47.85
0.16	903	1946	97.30	2.70
0,08	42	1988	99.40	0.6
Fond	11	1999	99.95	0.05

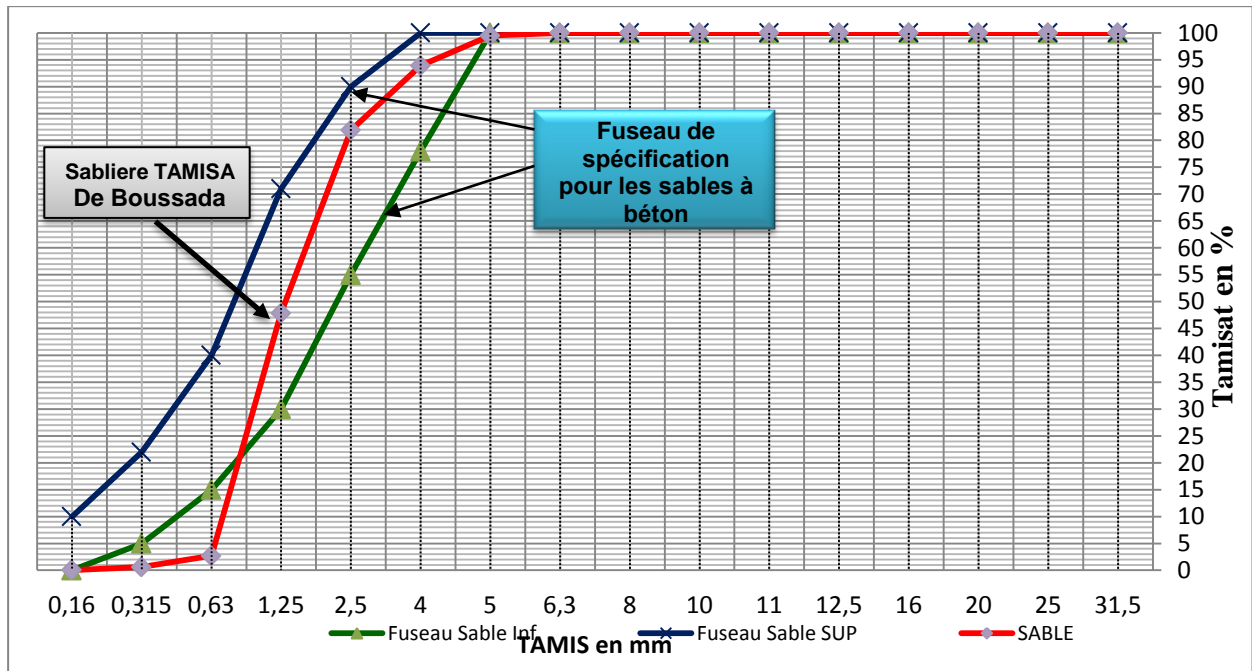


Figure III.1 : Courbe d’analyse granulométrique du sable de Boussada.

a) Module de finesse [NF EN 12620] :

calculé par la relation suivante : $M_f = \sum R_c / 100$. Ou : R_c : refus cumulé.

Les normes soviétiques spécifient de M_f des sables comme suit :

- Sables gros $M_f > 2.5$, Sables fin $1.5 < M_f < 2$
- Sables moyen $2 < M_f < 2.5$, Sables très fin $1 < M_f < 1.5$

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant : $M_f = 1.75$. (Le sable utilisé est considéré comme un sable fin).

III.3.1.3. Caractéristiques physiques du sable utilisé :

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

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

Tableau III.3 :La masse absolue de sable en (g/cm^3).

Essai	M_g (g)	V_e (cm^3)	V (cm^3)	ρ_s en (g/cm^3)
1	300	150	266	2.59
2	300	150	265	
3	300	150	266	

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

✚ Masse volumique à l'état lâche :

Qui est définir : $\rho_{app}=(M_2-M_1)/V_R$ et les résultats en (Tableau III.4) :

Tableau III.4 : La masse volumique apparente à l'état lâche en (g/cm³).

N ° d'essai	M ₂ (g)	M ₁ (g)	V _R (cm ³)	ρ_{app} (g/cm ³)	ρ_{appmoy} (g/cm ³)
1	1444	115	900	1.47	1.47
2	1450			1.47	
3	1448			1.48	

✚ Masse volumique à l'état compact :

Qui est définir : $\rho_c= (M_2-M_1)/V_r$, le (Tab. IV.5) représente les résultats obtenus :

Tableau III.5: La masse volumique à l'état compact du sable en (g/cm³).

Essais	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ_c (g/cm ³)	ρ_{moy} (g/cm ³)
1	115	1469	1.50	1.50
2		1464	1.49	
3		1473	1.50	

c) Porosité et compacité et indice des vides [NF EN 1097-3] :

Sont des propriétés essentiels, qui sont influent sur certains caractéristiques tel que : la résistance mécanique et la capacité d'absorption d'eau (Tab III.6).

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

B/ la compacité par la formule : $C= \rho_{app}/\rho_{abs} =1-P$

C/ l'indice des vides par la formule : $e=P/C$

Tableau III.6 : Porosité, compacité et indice des vides.

Porosité P(%)		Compacité C(%)		L'indice des vides E	
Lâche	Compact	Lâche	compact	Lâche	Compact
43.24	42.08	56.8	58	1.02	0.97

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

- ❖ Equivalent de sable visuel ($E_{S,V}$) : $E_{S,V} = (h_2/h_1) * 100$ (%)
- ❖ Equivalent de sable piston ($E_{S,P}$) : $E_{S,P} = (h_2'/h_1) * 100$ (%)

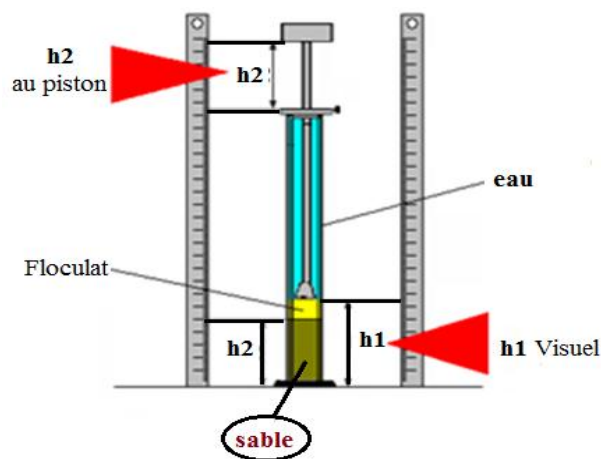


Figure III.2 :Principe de l'équivalent de sable.

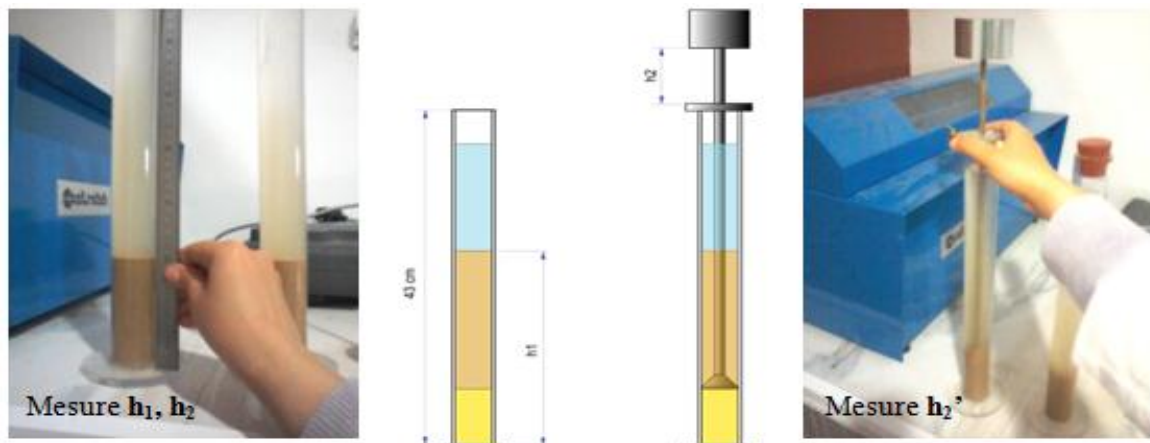


Figure III.3 : Essai équivalent de sable exécuté au laboratoire.

Tableau III.7: 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 argileuses risque d'entraîne d'un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau

Tableau III.8 : Résultats obtenus pour l'équivalent de sable.

Essais	h_1 (cm)	h_2 (cm)	E.S.V (%)	h_2' (cm)	E.S.P (%)
1	12.7	11.1	87.01	9.0	73.67
2	11.9	9.6	80.57	8.5	75.79
3	11.5	10	86.85	8.8	77.68

$\left. \begin{array}{l} E.S.V (moy) = 84.80\% \\ Et \\ E.S.P (moy) = 75.71\% \end{array} \right\}$ C'est un sable propre à faible pourcentage de farine argileux.

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

Les résultats obtenus en (Tableau III.9). que : $W = [(M_h - M_s) / M_s] * 100$ (%)

Tableau III.9 : 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	

IV.3.2. Caractéristique du gravier utilisé :

IV.3.2.1. Origine du gravier utilisé :

Notre gravier utilisé pour la confection du béton est obtenue par la démolition des éprouvettes en béton au niveau de laboratoire de génie civil à université de M'sila. Les fractions des graviers utilisés sont :

- Fraction 3/8.
- Fraction 8/16.

III.3.2.2. Analyse granulométrique [NF EN 933-5]:

Les résultats indiqués au (Tab IV.10 et IV.11) :

→ Fraction 3/8.

→ $M_{G3/8}=1.5$ kg.

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

Tamis (mm)	Refus partiel (g)				Refus cumulés (g)		Tamisât (%)
	01	02	03	Moy	(g)	(%)	
8	78.96	52.07	30.99	54.01	54.01	3.6	96.4
6,3	630.92	770.1	741.34	714.12	768.13	51.2	48.8
5	581.81	526.14	565.8	558.92	1327.05	88.46	11.54
4	141.08	133.67	131.7	136.48	1463.52	97.56	2.44
3,15	39.28	2.36	5.6	15.75	1479.28	98.61	1.39
2,5	21.05	9.74	11.84	14.21	1493.49	99.56	0.44
Fond	7.00	6.00	7.00	6.67	1500.16	100	0

→ Fraction 8/16

→ $M_{G8/16}=2$ kg.

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

Tamis (mm)	Refus partiel (g)				Refus cumulés (g)		Tamisât (%)
	01	02	03	Moy	(g)	(%)	
16	762.35	683.29	776.68	740.7	740.7	36.25	63.75
12.5	968.18	971.04	820.15	919.7	1660.4	81.27	18.73
10	260.93	223.82	290.04	258.2	1918.6	93.91	6.09

8	25.67	49.7	90.01	55.1	1973.7	96.60	3.40
6.3	19.01	21.72	22.59	21.1	1994.8	97.64	2.36
5	22.1	24.09	23.58	23.2	2018.0	98.77	1.23
Fond	21.73	26.34	27.28	25.1	2043.1	100	0

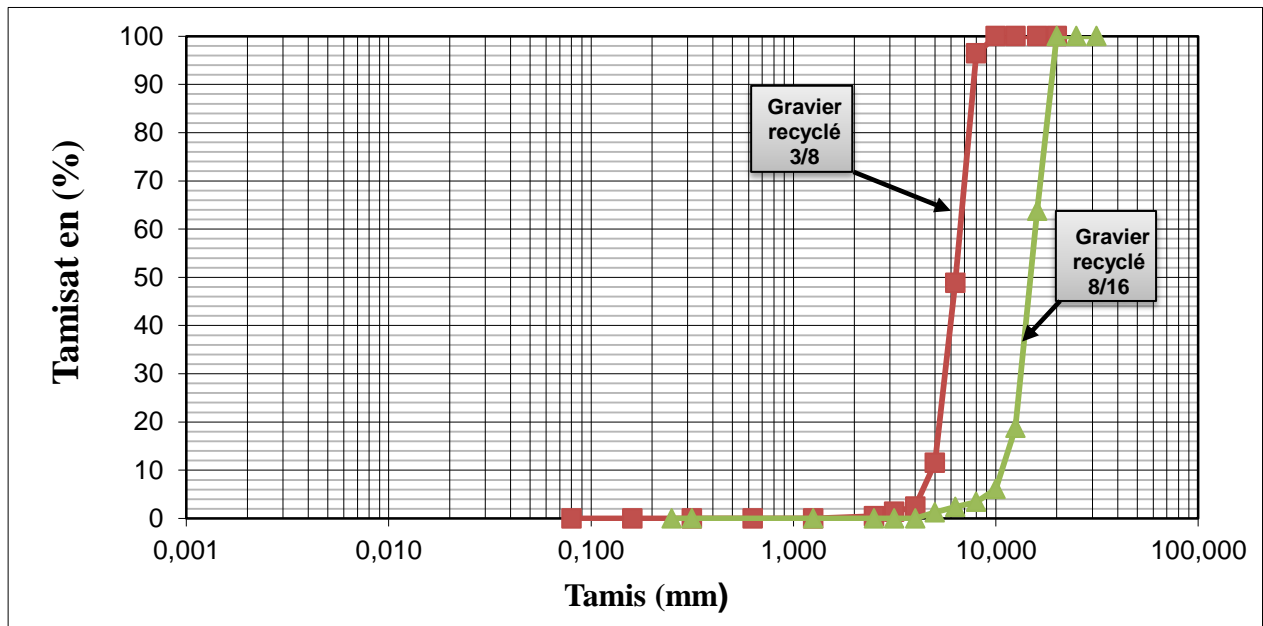


Figure III.4 : Courbe analyse granulométrique d'un gravier recyclé de deux fraction (3/8, 8/16).

III.3.2.3. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés :

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

Est déterminée par la formule suivante : $\rho = (M_2 - M_1) / V$

Tableau IV.12 : Masse volumique apparente du gravier recyclé.

Gravier	V(l)	M ₁ (Kg)	M ₂ (Kg)	ρ (kg/l)	ρ_{moy} (kg/L)
3/8	7	2.920	10.84	1.13	1.10
		2.920	10.55	1.10	
		2.920	10.49	1.08	
8/16	10	3.467	15.34	1.19	1.17
		3.467	15.11	1.16	
		3.467	15.19	1.17	

b) Masse volumique absolue :

Le mode opératoire est même effectuée pour le sable, et les résultats sont regroupés dans le (Tableau III.13).

Tableau III.13 : La masse volumique absolue du gravier recyclé.

Gravier	Essais	M(g)	V _e (cm)	V (cm)	ρ (g/cm ³)	ρ _{moy} (g/cm ³)
3/8	1	400	300	470	2.35	2.54
	2	400	350	500	2.67	
	3	400	400	555	2.58	
8/16	1	400	300	470	2.36	2.70
	2	400	450	590	2.86	
	3	400	500	640	2.85	

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

On calcule les paramètres (Tab 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	56.69	43.31	1.31
8/16	56.66	43.33	1.30

d) Teneur en eau du gravier [NF EN 1097-6] :

Tableau III.15 : Teneur en eau des graviers recyclés.

Gravier	M _h (g)	M _g (g)	W(%)	W _{moy} (%)
3/8	1000	980	2.04	5.47
	1000	945	5.82	
	1000	921	8.57	
8/16	1000	985	1.52	4.43
	1000	952	5.04	
	1000	937	6.72	

III.4.2.4. Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés :

a) Essai Los Angeles [NF EN 1097- 2] :

La résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles du matériau (**Figure III.5**), que : $L_A = (m/M) \cdot 100$.



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

Tableau III.16 : Caractéristiques mécaniques du gravier recyclé.

Gravier	Masse initiale M (kg)	Masse m (kg)	Coeff de los Angeles L_A (%)
3/8	5	1.175	25.30
8/16	5	1.490	29.9

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

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

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

Commentaire :

✚ Le gravier (3/8) : C'est un gravier **dur** ($L_A=25.30\%$) ($20 < L_A < 25$) et gradué.

✚ Le gravier (8/16) : c'est un gravier **assez dur** ($LA=29.9\%$) ($25 < LA < 30$), se trouve dans l'intervalle des graviers admissible.

III.3.3. Caractéristiques du ciment utilisé :

On utilise dans cette recherche, **CEM III/A** (ciment résistance aux sulfates) de classe **42.5** provient de la cimenterie Ain El-Kebira de Sétif. Mokaouem (**CEM III/A 42.5N-ES-**) pour béton de haute performance et qualité destiné à la construction des ouvrages dans un milieu agressif, exemple : « béton structurel, travaux maritimes, ouvrages massifs ».

III.3.3.1. Caractéristique physique :

Tableau III.18 : Caractéristiques physiques du (CEM III/A 42.5N-ES-).

Les Caractéristiques physiques		unité	Valeur
Masse volumique absolue		g/cm^3	3.1
Consistance normale		%	30 ± 2
La finesse (Blaine)		Cm^3/g	3500 – 4500
Exponcion le Chatelier		mm	< 10
Temps de prise	Début	Min	>60
	Fin		/
Résistance à la compression	2 jours	MPa	12 (>10)
	28 jours		50.15 entre (>42.5 et <62.5)

III.3.3.2. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé (CEM III/A 42.5N-ES-) :

Tableau III.19 : Les compositions chimiques du (CEM III/A 42.5N-ES-).

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	So ₃	Na ₂ O
Teneur%	29.6	9.84	56.76	3.24	5.19	2.55	0.23

III.3.3.3. Les caractéristiques minéralogiques du (CEM III/A 42.5N-ES-) :

Tableau III.20 : Les compositions minéralogiques du (CEM III/A 42.5N –ES-).

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Laitier
Teneur %	50	12	5	22	>60

III.3.4. Les Adjuvants :

Dans notre sujet de recherche, nous avons utilisé un type des adjuvants superplastifiants qui appelé « **MEDAFLOW 30** » fabriqués par la société Granites à Oued Smar-BP 85-16270 Alger (Tableau III.21) .

III.3.4.1. Description :

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

Tableau IV.21 : Caractéristique del’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.4.4.2. Domaines d’application :

Bétons à hautes performances, bétons autoplaçant et bétons pompés et précontraints.

III.4.4.3. Propriétés :

Tableau IV.22 : 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 œuvre	Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Figure III.23 : 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.4.4.4. 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.

III.4.5. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable du laboratoire de génie civil.

III.4.5.1. Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée :

Etablie en au laboratoire de chimie (M'sila). Elle est donnée par (Tableau III.24) :

Tableau III.24 : Caractéristiques chimiques de l'eau.

La mesure	Teneur en (mg/l)
Le temps de prise d'échantillon	10/05/2005 (9 :25)
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore Cl ⁻	234.3
Sulfate So ₄ ⁻	351.6
Magnésium Mg ²⁺	110.8
Sodium Na ⁺	/
Calcium Ca ²⁺	267.2
Sédiment sec	1412
Rééligibilité d'oxydation en eau	1024

III.4.6. La fumée de silice (FS):

On a défini ce type de filler dans le chapitre précédant (I), sont des substances minérales composée essentiellement de silice du couleur gris clair comme le ciment, que possède une propriété pouzzolanique. Grace à la structure fine de la fumée de silice (**10 à 20** fois que le ciment) (**Figure III.6**).



Figure III.6 : Poudre de la fumée de silice.

III.4.6.1. Caractéristiques chimiques et physiques de la fumée de silice:

Tableau III.25 : Caractéristiques chimiques et physiques de la fumée de silice.

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Valeurs	Unité
SiO ₂	85 – 95	Masse volumique	2.2	g/cm³
CaO	0.8 – 1.2	absolue		
MgO	1 – 2	Densité	250	Kg/cm³
Fe ₂ O ₃	0.05 – 1	Surface spécifique	15000	m²/Kg
Al ₂ O ₃	1 – 3	de Blaine		/
Pert de feu	0.5 – 1	Taille des particules	<1	µm

III.4.7. Les fillers utilisés (calcaire) :

On a défini ce type de filler dans le chapitre précédant (I).

III.4.7.1. Caractéristiques physiques et chimiques du filler de calcaire :

La composition chimique et les propriétés physiques du filler calcaire sont présentées dans le (**Tableau III.26**).

Tableau III.26 : La composition chimique et les propriétés physiques du filler calcaire.

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

III.5. Conclusion :

Ce chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux utilisés (Ciment, fumée de silice, 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 caractérisée 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.2.1. 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 : $G/S=0,9$. Ou $G/S=1$.
 - 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 : **$400 kg/m^3$** du ciment.
 - **$40 kg/m^3$** du filler Fumée de silice (10% du poids du ciment).
 - $E/(C+F) = 0,6$.
 - $G/S=1$
- **Détermination de la masse de chaque constituant :**
 - On a: $C=400 kg/m^3$.
 - $FS= 40 kg/m^3$
 - $E/(C+F) = 0,5$ donc $E=0,5*(400+40)$ $E= 220.L/m^3$.
 - $G+S=660$ $G=660-S$.
 - $S=660/2$ $S= 330 l/m^3$.
 - $G= 660-330$. $G= 330 l/m^3$.
 - Le dosage en superplastifiant est 2% de la masse ciment et filler.
 - $SP=0.02 (400+40)$.
 - $SP=8,8kg/m^3$.

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

Constituants	Quantité	Unité
Sable	800	kg /m ³
Gravier 3/8	400	kg /m ³
Gravier 8/16	416	kg /m ³
Ciment	400	kg /m ³
Eau	220	kg /m ³
Super plastifiant	8.8	kg /m ³
Fin	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, fumée de silice) 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 matériel et le mode opératoire sont détaillés dans la norme [NF EN 12 350-8] (Figure IV.1)

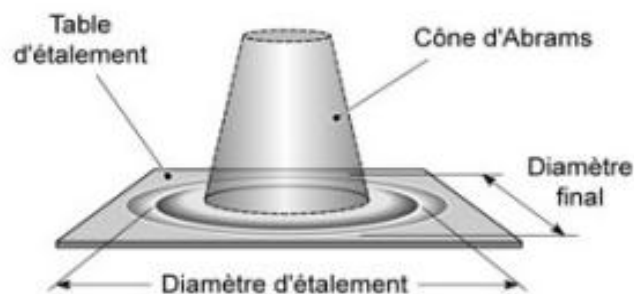


Figure IV.1 : Essai d'étalement par cône d'Abrams sur les BAP.

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).

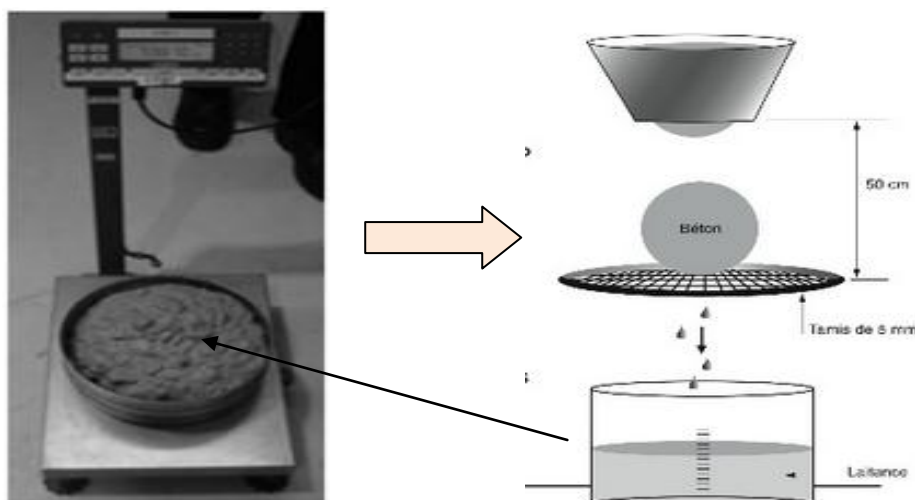


Figure IV.2 : Principe de l'essai stabilité de tamis sur BAP.

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].

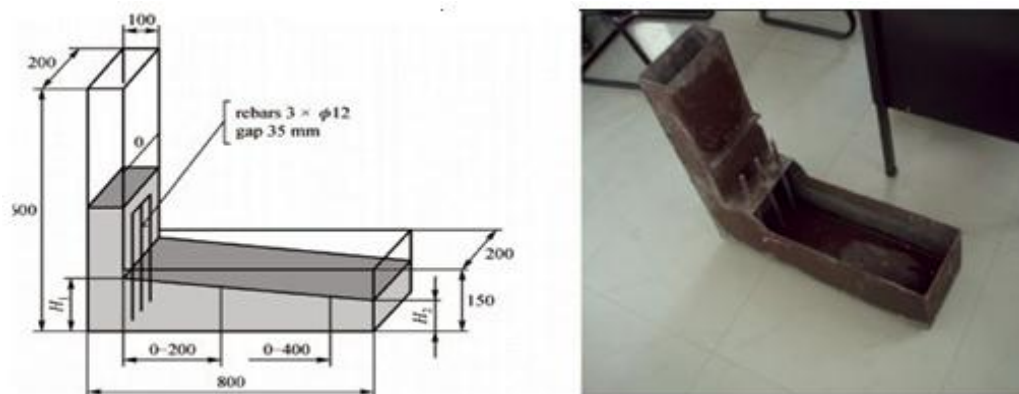


Figure IV.3 : Boîte en L pour le béton auto-plaçant.

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 cm²**. **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 prisme (7x7x28 cm³) de béton (Figure IV.5) . On calcul de la résistance en traction du béton R_t un terme correctif de 0,6 ($R_t = 0,6 R_{tf}$) [27].

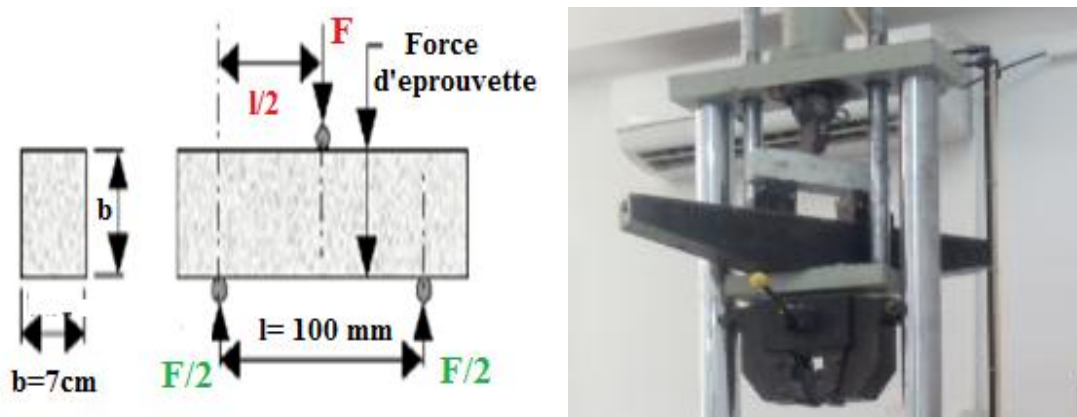


Figure IV.5 : Principe de l'essai traction par flexion.

IV.5.3. Module d'élasticité :

Par l'équation: $\sigma = E * \epsilon$. La formule réglementaire du module: $E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$

IV.5.4. Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NF EN 12398] :

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



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

IV.5.5. Les Ultrasons [NF EN 12504-4] :

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

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

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

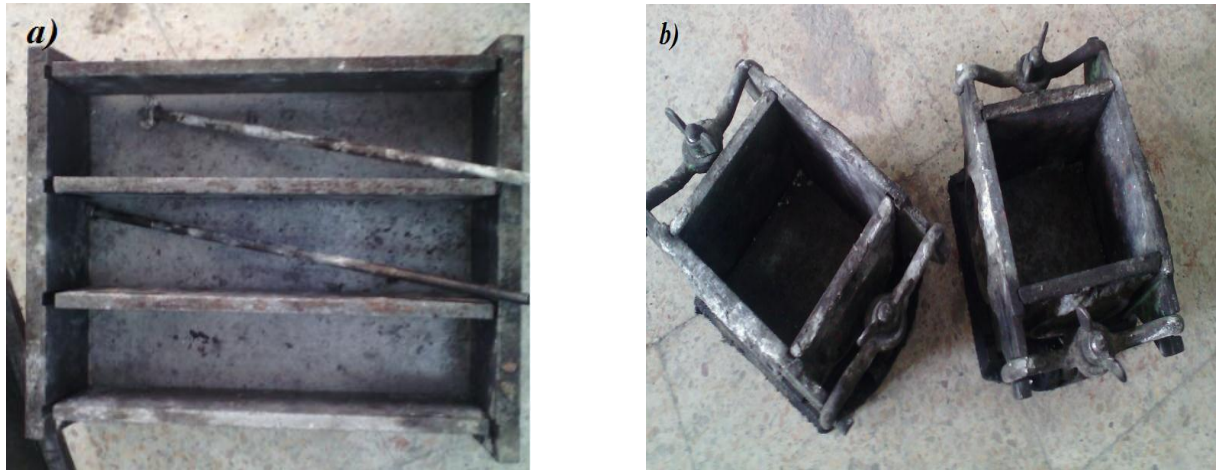


Figure IV.8 : Type de l'éprouvette utilisée :a) prismatique, b) cubique.

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 $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

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 :

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des essais rhéologiques, physiques et mécaniques réalisés sur un béton autoplaçant additionné par deux types d'ajouts (Fumée de silice et calcaire) selon des différents pourcentages allant de 0 % à 10 % ceci, pour voir l'influence de la nature et le pourcentage des additions sur les propriétés du BAP à l'état frais et à l'état durci.

V.2. Les formulations des bétons étudiés :

- ❖ BAP_{TR} → Béton autoplaçant recyclé témoin sans fillers.
- ❖ BAP_{RI} → Béton autoplaçant recyclé avec l'ajout de (5% fumée de silice, 0% calcaire).
- ❖ BAP_{RII} → Béton autoplaçant recyclé avec l'ajout de (5% calcaire, 0% fumée de silice).
- ❖ BAP_{RIII} → Béton autoplaçant recyclé mélange de (5% calcaire, 5% fumée de silice).
- ❖ BAP_{RIV} → Béton autoplaçant recyclé mélange de (2.5% fumée de silice, 7.5% calcaire).
- ❖ BAP_{RV} → Béton autoplaçant recyclé mélange de (7.5% fumée de silice, 2.5% calcaire).
- ❖ BAP_{RVI} → Béton autoplaçant recyclé avec l'ajout (10% fumée de silice, 0% calcaire).

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 caractériser ce type de béton. Qui permet d'étudier les propriétés du BAP à l'état frais par :

- ✚ **Essai de cône d'Abrams** (essai d'étalement pour les milieux non confiné) [NF EN 12 350 -8].
- ✚ **Essai boîte en L** (contrôlée l'écoulement dans les milieux confiné) [NF EN 12 350 -10].
- ✚ **Essai 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 les ajouts, la fumée de silice et le filler calcaire, ainsi que leurs masses volumiques.

Tableau V.1 :Caractéristiques rhéologiques des BAP étudiés.

Type du béton	Étalement (cm)	Stabilité au tamis (%)	Boite en L (h_2/h_1) (%)	ρ_v (Kg/m ³)
BAP_{TR}(0 FS, 0 FC)	69	14.18	91	2.403
BAP_{RI}(5FS, 0FC)	74	7.11	92	2.324
BAP_{RII}(5FS, 5FC)	72.5	15.43	87	2.338
BAP_{RIII}(5FS, 5FC)	67	11.27	81	2.343
BAP_{RIV}(2.5FS,7.5FC)	66.5	18.99	80	2.34
BAP_{RV}(7.5FS,2.5FC)	69	5.57	91	2.38
BAP_{RVI}(10 FS, 0 FC)	67	14.59	82	2.258

Commentaire :

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

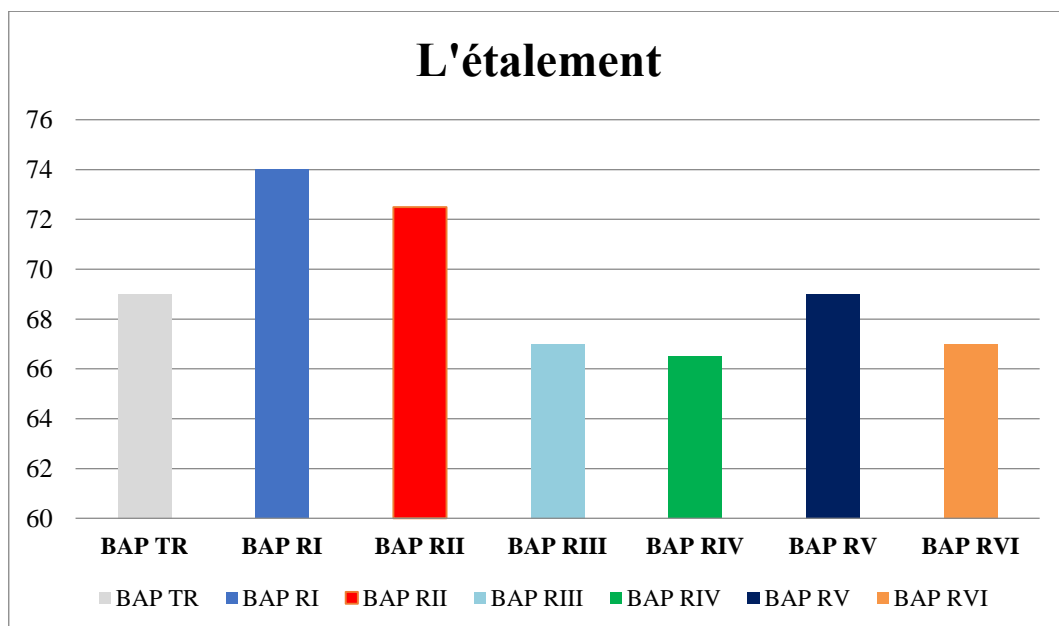


Figure V.1 : l'étalement en fonction du type de béton.

L'introduction des poudres de fumée de silice entraîne une amélioration de l'étalement par rapport au béton de référence **BAP_{TR}** par une augmentation environ 7 % dans la formulation contenant **5%** de FS et **3 %** pour celle qui contient **10 %** de FS.

D'après les résultats dans le tableau V.1 et la figure V.1 ci-dessus, on constate une légère amélioration d'étalement de l'ordre de **5 %** dans la formulation contenant **5 %** de **FC**.

Pour un **BAP** de mélange combiné (filler de calcaire et fumée de silice) de même dosage (**5% FS, 5% FC**) celui ci, affiche une réduction d'environ **2.9 %** pour le **BAP_{RIII}** et de **3.62%** pour **BAP_{RV}** de (**7.5% FS, 2.5% FC**) par rapport au **BAP_{TR}**.

D'après la figure V.1, on voit clairement que l'étalement de **BAP** avec addition de (**FS**) est supérieure à celle des **BAP** à base de calcaire (**FC**), ceci peut être expliqué par le fait que la finesse de **FS** est nettement supérieure à celle de **FC** alors la demande en eau du poudre de fumée de silice est plus importante.

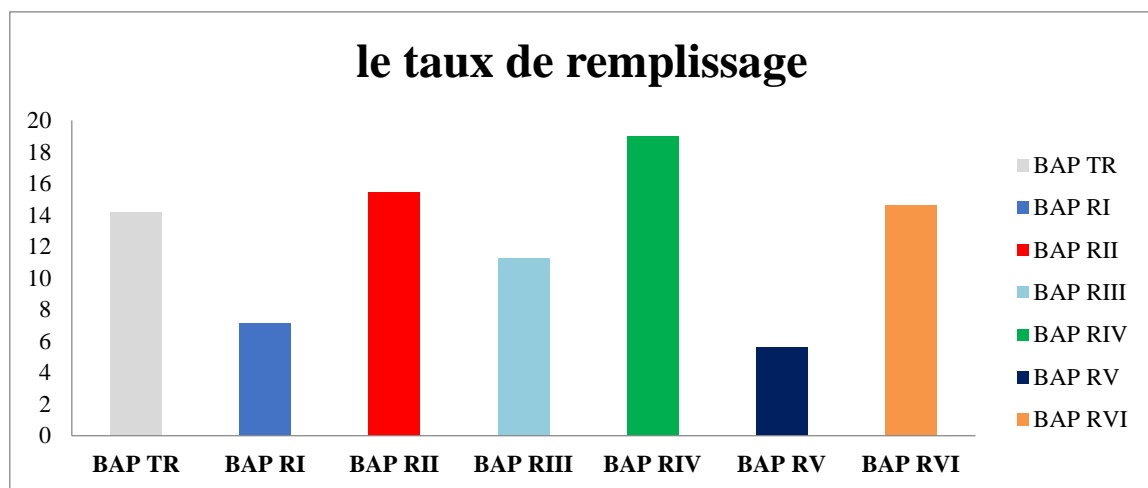


Figure V.2 : Le taux de remplissage en fonction du type de béton.

D'après la figure V.2, la majorité des bétons réalisés indiquent une bonne stabilité au tamis et une bonne homogénéité sans ségrégation statique. En effet, la quantité de laitance est située dans le domaine des **BAP** dictée par les normes (soit inférieure légèrement à **15%**) pour tous les **BAP** validés, donc on peut déduire que le rôle des additions notamment la fumée de silice œuvre pour but de limiter les risques de ségrégation et de ressuage. Par contre les deux mélanges **BAP_{RII}** et **BAP_{RIV}** indiquent un taux de remplissage supérieure à **15%**, donc c'est une stabilité critique à cause de l'augmentation de dosage de calcaire qui n'absorbe pas l'eau d'une façon uniforme et l'essai est à refaire pour convenance sur site.

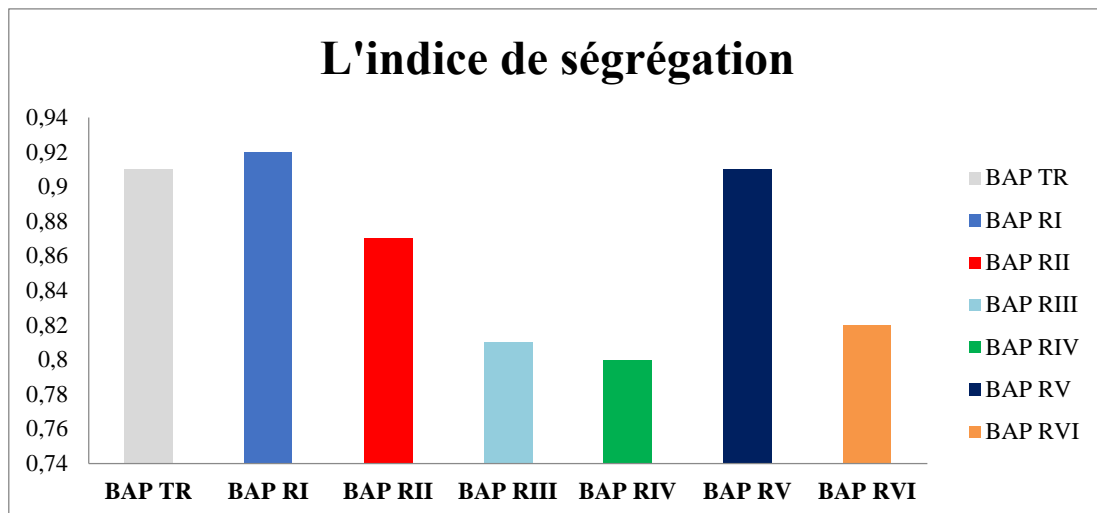


Figure V.3 : L'indice de ségrégation dynamique en fonction du type de BAP(L-box test).

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) estimé acceptable par ce test selon les normes en vigueur pour les bétons autoplaçants. Ceci peut être expliqué par l'effet suivant :

Dès que le ciment se met en contact avec l'eau, les réactions d'hydratations seront plus poussées et plus accélérées et la germination est facilitée par la présence de la silice qui existe dans la poudre de la fumée de silice, sans oublier l'absorption élevée de fumée de silice par rapport à filler calcaire et sans omettre que l'augmentation de l'absorption est en fonction de la finesse, ce qui traduit la variation de la fluidité et l'aisance d'écoulement [13].

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

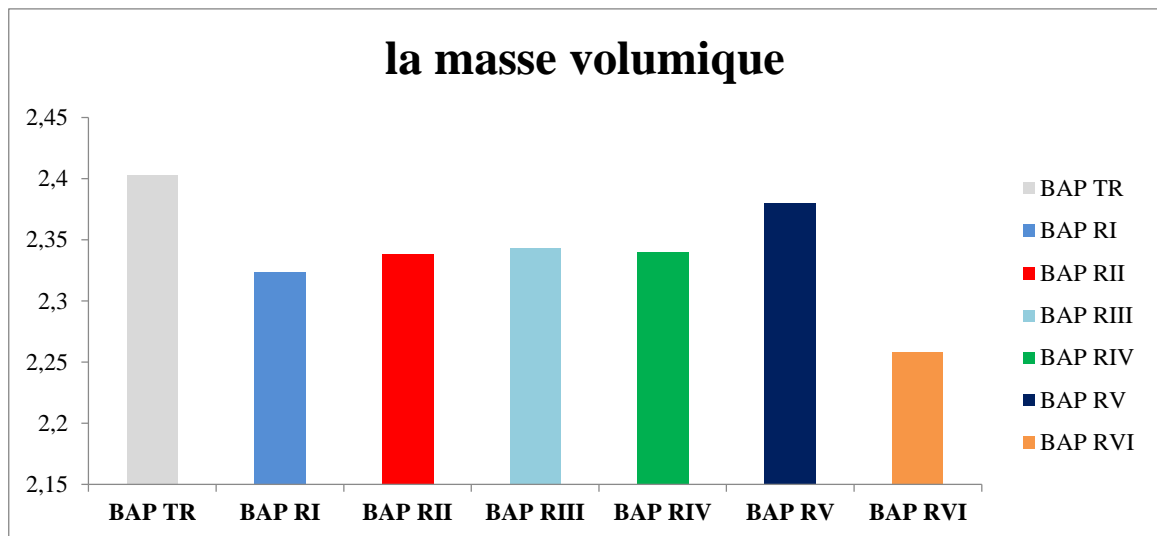


Figure V.4 :La masse volumique en fonction de types de BAP (état frais).

L'effet de la poudre de la fumée de silice et fillers de calcaire, la finesse et le superplastifiant sur la masse volumique est présenté sur la figure V.4. On observe que la masse volumique des **BAP (FC)** est supérieure à celle des **BAP (FS)**, d'une façon très légère de l'ordre de **1%**. Avec l'augmentation du dosage des additions minérales, la masse volumique diminue comme dans le cas de **BAP** de **10%** de **FS** qui enregistre une réduction de **6.04%** par rapport au **BAP_{TR}**.

D'après la figure V.4, on remarque que les fillers de calcaire caractérisés par leur finesse s'insèrent dans les petits vides entre les grains fins de sable, de gravier et du ciment, il en résulte une meilleure compacité, ce qui justifie l'augmentation légère de la masse volumique par rapport à la fumée de silice de l'ordre **0.6%** pour **5%** d'ajout. Le dosage de **7.5%** (FC) calcaire par rapport à **10%** de fumée de silice donne une masse volumique supérieure d'environ **5%**. On peut dire qu'il y a une proportionnalité entre la masse volumique et le pourcentage d'ajout, cette proportionnalité peut être expliquée par l'effet de l'arrangement des micros grains qui s'infiltreront dans les micros vides en augmentant la fermeté du béton donc on peut prouver que l'effet granulaire, conditionné par une finesse de mouture élevée par rapport à celle du ciment explique ce phénomène et bien sûr par l'intermédiaire du superplastifiant qui assure une meilleure mobilité.

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

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

Le tableau V.2 et la figure V.5 ci-dessous présentent les caractéristiques mécaniques d'un **BAP_{TR}** (sans ajout) et les mélanges des **BAP** avec additions (ajout par la fumée de silice et

calcaire) selon des pourcentages variables de (0%, 2,5%, 5%, 7,5% et 10 %) respectivement, par poids du ciment.

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

Résistance à la traction par flexion à 28 (jours)							
Types(BAP)	BAP _{TR}	BAP _{RI}	BAP _{RII}	BAP _{RIII}	BAP _{RIV}	BAP _{RV}	BAP _{RVI}
R _t (MPa)	6.52	7.42	6.40	6.88	7.26	6.11	6.19

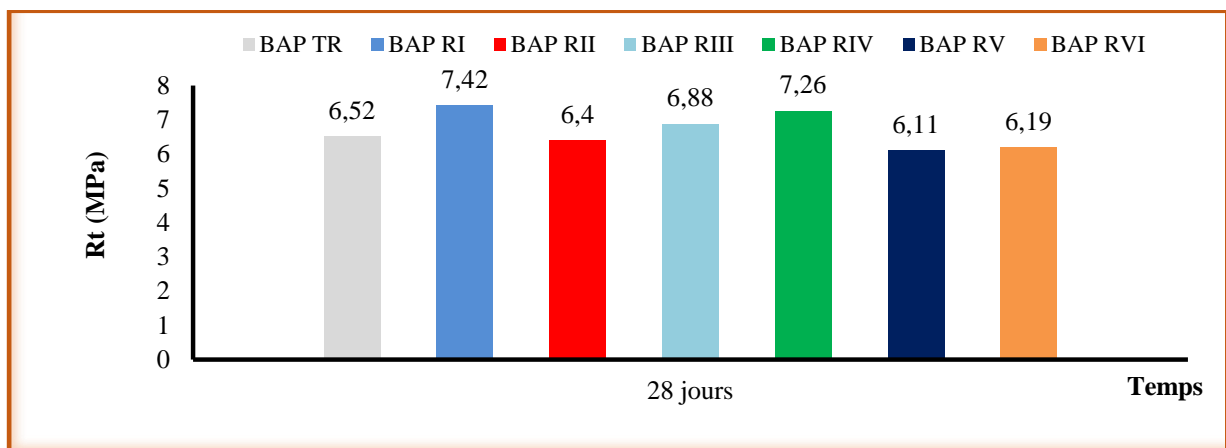


Figure V.5 : Évolution de la Résistance à la traction par flexion en fonction du type du béton à 28 jours.

D'après les résultats inscrits dans le tableau V.2 et la figure V.5 ci-dessus, on trouve une augmentation de résistance à la traction par flexion de l'ordre de **12.13 %** dans la formulation contenant **5%** de la fumée de silice seul et une réduction d'environ **5.06%** pour celle qui contient **10 % FS** par rapport un béton sans ajouts. Donc on peut déduire que l'introduction de la fumée de silice joue un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des **BAP** à certain dosage. la fumée de silice, donne une bonne résistance pour les pates cimentaires ; ceci est attribué à l'activité pouzzolanique qui consiste à la portlandite Ca(OH)_2 libérée par l'hydratation du ciment pour donner naissance à des silicates de calcium hydratés **CSH** supplémentaires de deuxième génération occupant un espace important de la matrice cimentaire grâce à la taille nanométrique des particules de la fumée de silice et contribuant ainsi au développement de la résistance [29].

Pour les fillers de calcaire une légère réduction de l'ordre de **2 %** par rapport au **BAP_{TR}**, les mélanges **BAP** de **FS** et **FC** indiquent une amélioration de résistance d'environ **14%** par rapport **BAP_{TR}**. Alors, les fillers de calcaire semblent avoir une faible influence sur la demande en eau, et peut conduire à une légère diminution de la viscosité du mélange cimentaire pour le matériau

BAP_{RIV}, par contre la fumée de silice a une demande en eau importante par rapport au ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité et mécaniques de la pâte de ciment et augmenter la viscosité pour le **BAP_{RV}** [30].

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_{cen} (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BAP_{TR}	20.32	26.79	33.44
BAP_{RI}	23.01	25.57	31.82
BAP_{RII}	18.42	23.59	27.21
BAP_{RIII}	26.53	34.52	37.00
BAP_{RIV}	20.21	24.50	26.96
BAP_{RV}	23.03	26.74	31.46
BAP_{RVI}	21.17	29.31	35.1

On remarque dans le tableau V.3 que **BAP_{RIII}** de (5%FS et 5 % FC) pour chaque ajouts montre une résistance de 37 MPa, et enregistre une amélioration au environ de 10%. Ces fillers sont composées principalement de SiO_2 pour la fumée de silice (FS) et CaCO_3 le calcaire (FC). Ces éléments accélèrent l'hydratation du C_3S , ce qui améliore les résistances aux jeunes âges. Cet effet a tendance à se stabiliser à long terme. Le **BAP_{RVI}** (de 10% FS) enregistre une amélioration par 5 % comparé au matériau **BAP_{TR}**. Cette amélioration explique par la grande finesse de ces types d'additions, qui améliore la distribution granulométrique et la compacité de béton. Les **BAP** recyclés sans ajout enregistrent une réduction de 4.8%, 18.6% pour **BAP_{RI}**, **BAP_{RII}**, respectivement.

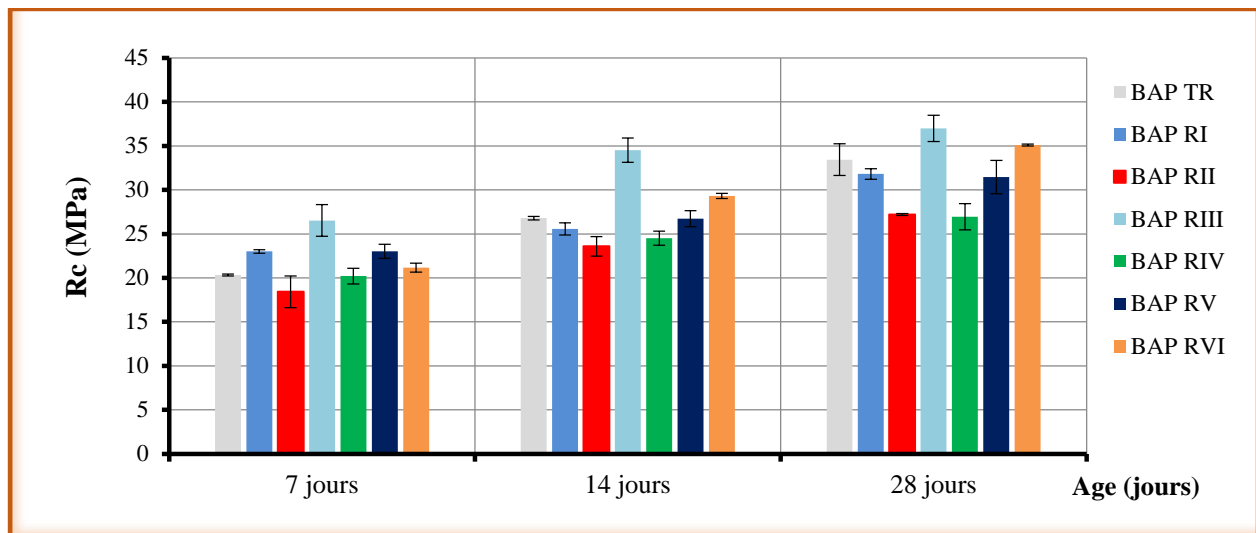


Figure V.6 : Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge des BAP.

D'après la figure V.6 le **BAP_{RIV}** avec un taux élevé de calcaire **7,5%** indique une faible résistance par rapport aux autres types de béton d'environ **20 %**. Cette réduction dépend de la nature, de la finesse et du dosage de filler soit **FS** ou **FC**. Le dosage au-delà de **5%** pour le calcaire 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].

Les mélanges avec ajout de fillers de calcaire donnent des valeurs de résistance à la compression inférieures en comparaison à l'addition (**FS**). Cependant, tous les **BAP** combiné ou avec fumée de silice seule donne les meilleures réponses mécaniques. La valeur maximale est établie pour un mélange combiné **BAP_{RIII}** (**5 % FS** et **5 % FC**) de plus de **37 MPa**. La substitution pour les deux autres avec par des taux de fumée de silice importante demeure avantageuse pour les **BAP** confectionnés avec des résistances au delà de **30 MPa**.

V.4. Module d'élasticité statique (E_i) :

Dans cette étude on s'intéresse à déterminer les caractéristiques mécaniques tel que le module d'élasticité (E_i) à partir les résultats obtenus de la résistance à la compression d'un béton à l'âge de 28 jours . Le tableau V.4 suivant présente les résultats obtenus pour (E_i) :

Tableau V.4 : Résultats du module d'élasticité des BAP étudiés.

Module d'élasticité statique (E_i) à 28 jours							
Type de béton	BAP _{TR}	BAP _{RI}	BAP _{RII}	BAP _{RIII}	BAP _{RIV}	BAP _{RV}	BAP _{RVI}
E_i (MPa)	$3.5*10^4$	$3.4*10^4$	$3.3*10^4$	$3.7*10^4$	$3.2*10^4$	$3.4*10^4$	$3.6*10^4$

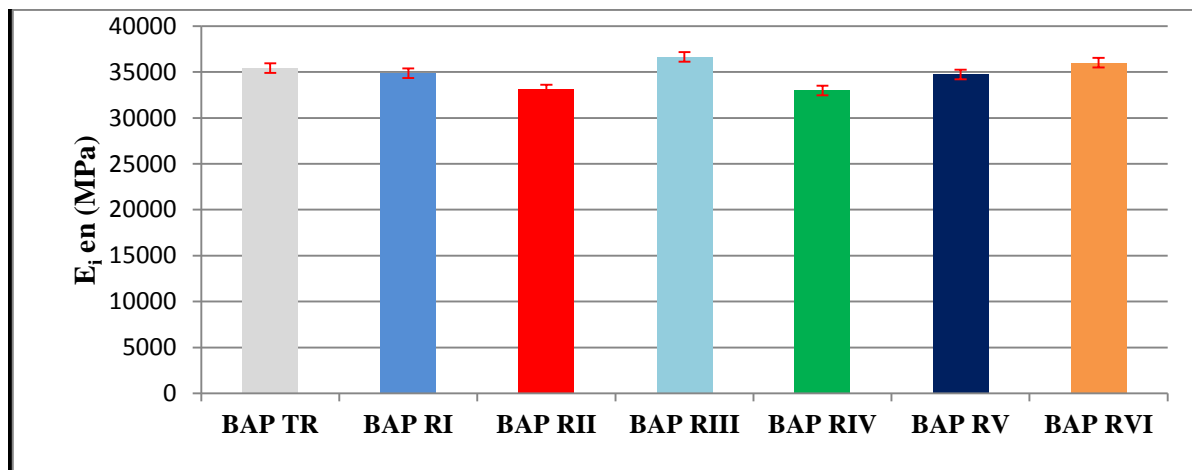


Figure V.7 : Evaluation du module d'élasticité en fonction du type de BAP à 28 jours.

La figure V.7 représente la variation du module d'élasticité des différents bétons auto-plaçants. On remarque que le **BAP_{RIII}** avec un ajout combiné d'additions (**FS** et **FC de 5 %**) améliore le comportement mécanique de l'ordre **3%** comparé au **BAP_{TR}**. Le **BAP_{RVI}** affiche une amélioration d'environ **9 %** avec **10%** de dosage en substitution (**FS**) ; donc on peut déduire que l'augmentation de dosage de **FS** donne une meilleure homogénéité entre les grains. Par contre les autres types des **BAP** surtout lorsque on augmente le dosage de calcaire on remarque une réduction de l'ordre **7 %** pour **BAP_{RIV}** comparés au **BAP_{TR}**, ce qui explique le rôle de la nature de l'addition ainsi que l'effet de dosage de ce dernier sur les propriétés mécaniques des **BAP** recyclés avec ajout de calcaire.

V.5. Essais non destructifs (END) :

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

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

Type de béton	ρ_{durci} (Kg/m ³)		Age (jours)	Scléromètre		Ultrason			
	ρ_{durci}	Moy		Indice (Is)	Moy	t (μs)	Moy	V(Km/s)	Moy
BAP _{TR}	2.354	2.337	7	30	30±1	29.35	28.92	3.4	3.45±0.1
	2.335			29		28		3.57	
	2.324			32		29.4		3.4	
	2.324	2.327	14	31	32±1.5	27.39	27.37	3.65	3.66±0.1
	2.312			32		25.83		3.87	
	2.346			35		28.9		3.46	
	2.313	2.32	28	40	40±0.1	22.72	22.45	4.4	4.42±0.1
	2.324			41		21.92		4.56	
	2.324			41		22.72		4.3	
BAP _{RI}	2.354	2.345	7	33	36±1.5	25.1	25.06	3.98	3.99±0.02
	2.329			39		24.8		4.03	
	2.354			36		25.3		3.96	
	2.33	2.331	14	37	37±0.5	23.9	23.56	4.187	4.25±0.04
	2.318			38		23.4		4.277	
	2.345			37		23.4		4.277	
	2.326	2.335	28	45	44±1	22.5	22.86	4.44	4.37±0.04
	2.321			47		23.2		4.31	
	2.359			41		22.9		4.36	
BAP _{RII}	2.299	2.299	7	36	33±1.5	26.9	26.7	3.72	3.74±0.04
	2.315			32		26.3		3.8	
	2.307			33		26.9		3.71	
	2.306	2.299	14	33	33±0.5	26.6	25.3	3.76	3.83±0.04
	2.3			34		25.3		3.96	
	2.292			34		25.8		3.88	
	2.332	2.334	28	40	39±0.5	24.5	24.46	4.08	4.08±0.02
	2.34			39		24.3		4.11	
	2.331			40		24.6		4.06	
BAP _{RIII}	2.304	2.295	7	33	31±0.5	39.62	39.5	2.6	2.53±0.08
	2.294			28		39.82		2.43	
	2.287			34		39.06		2.56	
	2.365	2.328	14	36	36±0.5	25.6	26.06	3.9	3.83±0.05
	2.303			37		26.3		3.8	
	2.318			37		26.3		3.8	
	2.339	2.337	28	42	41±1	25.7	25.33	3.89	3.95±0.06
	2.33			44		25.3		3.95	
	2.342			39		25		4	

BAP_{RIV}	2.316	2.297	7	31	31±0.5	26.6	26.66	3.76	3.75±0.01
	2.252			30		26.8		3.73	
	2.373			32		26.6		3.76	
	2.333	2.347	14	35	36±1	24.5	24.46	4.01	4.09±0.05
	2.364			38		24.3		4.12	
	2.341			36		24.3		4.12	
	2.279	2.275	28	35	38±1.5	23.9	23.8	4.19	4.2±0.02
	2.283			38		23.6		4.23	
	2.265			43		23.9		4.19	
BAP_{RV}	2.316	2.247	7	33	33±1.5	24.8	24.76	4.03	4.03±0.02
	2.273			35		24.9		4.02	
	2.252			31		24.9		4.06	
	2.287	2.304	14	37	36±0.5	24.1	23.9	4.15	4.18±0.02
	2.346			36		23.8		4.2	
	2.279			35		23.8		4.2	
	2.307	2.309	28	40	39±1	23.4	23.26	4.28	4.3±0.01
	2.329			38		23.2		4.31	
	2.292			40		23.2		4.31	
BAP_{RVI}	2.129	2.321	7	30	29±0.5	33.33	33.89	2.8	2.95±0.05
	2.241			29		35.71		2.8	
	2.324			30		34.48		2.9	
	2.327	2.329	14	33	33±1	26.31	26.31	3.8	3.8±0.14
	2.315			33		27.18		3.68	
	2.347			35		25.13		3.96	
	2.331	2.341	28	34	35±0.5	20.83	22.32	4.8	4.48±0.3
	2.332			36		22.72		4.4	
	2.362			35		23.52		4.25	

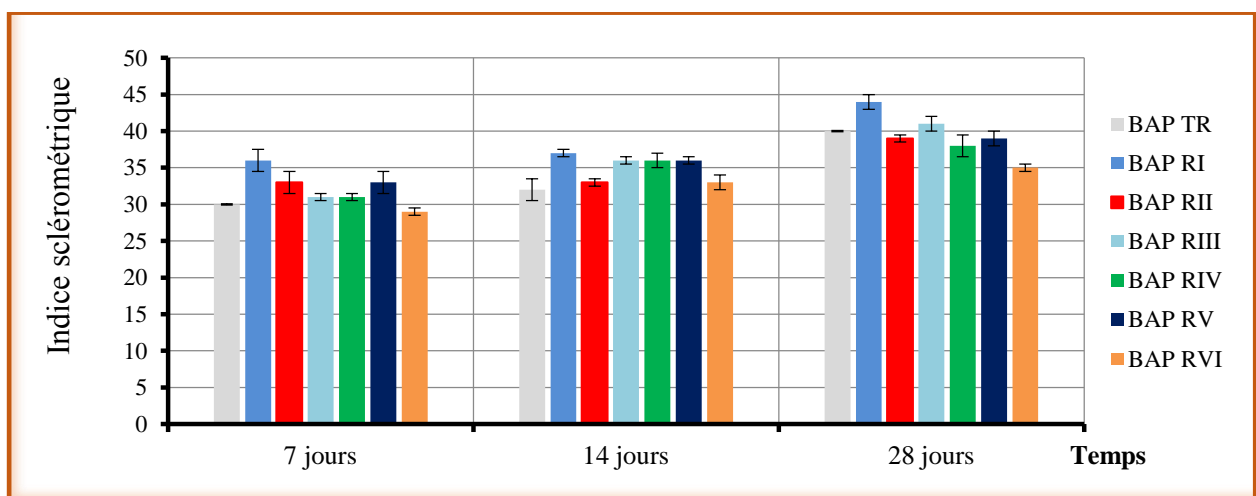


Figure V.8: Evaluation de l'indice sclérométrique en fonction de l'âge pour les BAP étudiés.

À titre de comparaison, la figure VI.8 représente l'histogramme des valeurs de l'indice sclérométrique des différents bétons autoplaçants en fonction de l'âge. Ce graphe montre que le béton à 5% de fumée de silice donne la plus grande valeur par une amélioration de 9% par rapport de BAP_{TR} à 28 jours d'âge. Le mélange combiné de FS et FC à égal dosage de 5 % enregistre une amélioration de 2.4% par rapport à ce dernier.

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

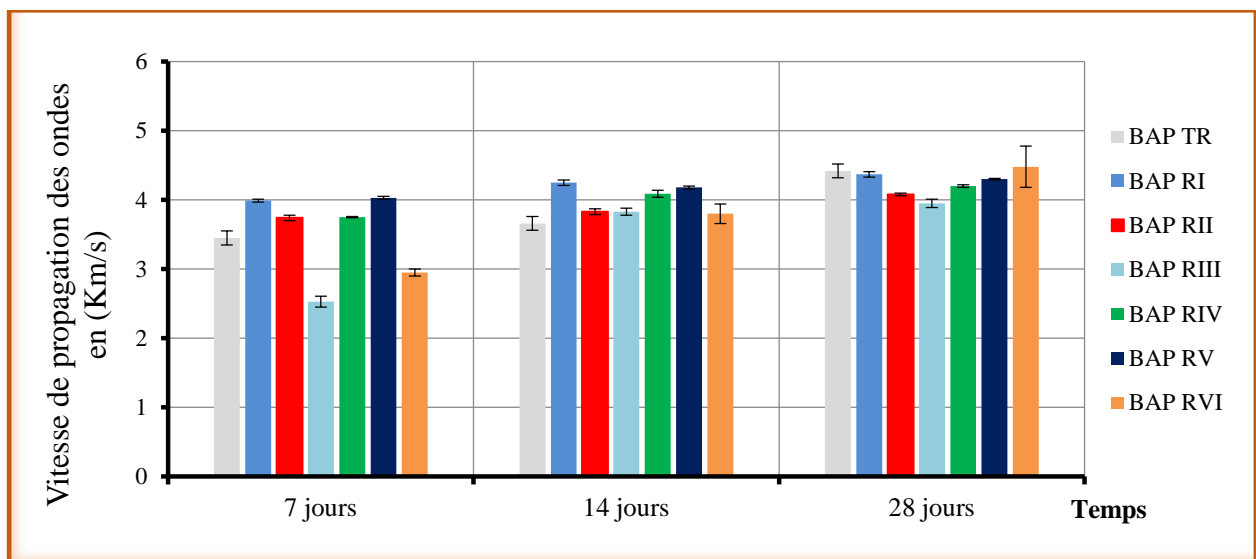


Figure V.9: Evaluation de vitesse de propagation des ondes en fonction de type de BAP.

Selon la figure V.9, 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 des additions soit FS ou FC il y a une amélioration selon l'âge de bétons 7, 14 et 28 jours par rapport le BAP_{TR} .

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.6. Essai pour la durabilité :

V.6.1. 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	BAP _{TR}	BAP _{RI}	BAP _{RII}	BAP _{RIII}	BAP _{RIV}	BAP _{RV}	BAP _{RVI}
ω (%)	6.03	8.03	5.16	4.85	7.2	7.61	8.35

La figureVI.10, représente l'histogramme des différentes valeurs du taux d'absorption des différents bétons autoplaçants étudiés.

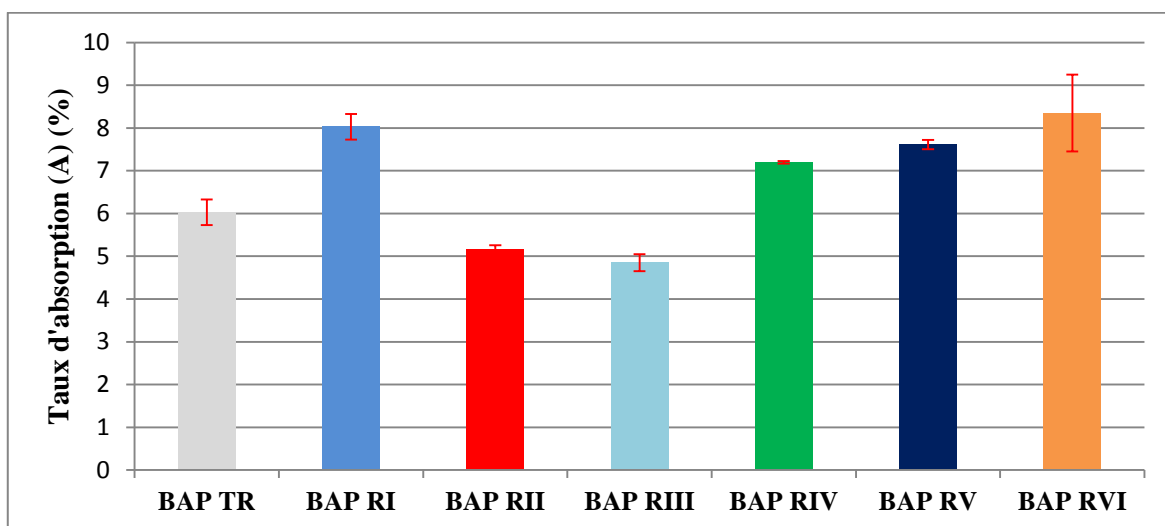


Figure V.10: Evaluation de taux d'absorption (A) des différents BAP étudiés.

Le **BAP_{RVI}** indique un taux d'absorption maximal de **8.35 % (10%FS)**, suivi du **BAP_{RI}** à une valeur de **8.03% (5%FS)** et **BAP_{RV}** une valeur de **7.61% (2.5 FS et 7.5 FC)**, avec une augmentation de **27.8%**, **24.9%** et **20.8%**, respectivement par rapport au béton de référence **BAP_{TR}**. Ceci, peut être expliqué par une porosité importante ou une présence de vides rempli par l'eau après immersion d'une part liée au types d'addition et le dosage. Autres mélanges semblent enregistrer des valeurs proches ou inférieures à celles du matériau sans ajouts **BAP_{TR}**. Cet variation de taux d'absorption se traduit selon [30]:

- ❖ A L'effet de l'utilisation des granulats recyclé, qui contient des restes de pate cimentaire peut absorpée l'eau et réduire le comportement mécanique de béton.

- ❖ A l'effet de l'ajouts de fumée de silice par différents pourcentages, demande en eau importante par rapport au ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité et mécaniques de la pâte de ciment. Et bénéfiques sur la microstructure du béton qui sont dus à l'effet filler et à la réaction pouzzolanique.
- ❖ Les fillers calcaires ne réagissent pas ou peu chimiquement avec les composants du ciment ou l'eau de gâchage, De nature inerte. Une faible influence sur la demande en eau. Il est à constater que le **BAP_{RII}** et **BAP_{RIII}** donne des valeurs de l'absorption minimale de au environ de **4 %** qui reste inférieures en comparaison avec tout les mélanges **BAP** étudiés. Ceci, nous conduit à conclure que la combinaison de **5 %** calcaire et fumée de silice demeure performante pour confectionner un béton de qualité et durable avec un taux d'absorption maîtrisé [31].

V.7. Conclusion

Le présent chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus de cette étude, leurs analyses et les interprétations. A l'état frais, Pour voir l'influence du type, du pourcentage de l'addition (fumée de silice **FS** ou fillers de calcaire **FC**) et d'après les résultats on observe avec l'augmentation du dosage de l'ajout surtout la fumée de silice les **BAP** recyclés voient une amélioration sur les propriétés rhéologiques. A l'état durci, aussi l'augmentation de dosage des ajouts et leur nature est remarquable surtout pour la combinaison optimale de **5 %** d'ajout, qui améliore les performances mécanique tel que : (résistance, module d'élasticité). Ainsi, la durabilité ou un taux d'absorption minimale état enregistré. Le rôle fillers de remplissage des fillers de calcaire et celui d'activation du **FS** sont évident sur le comportement des **BAP** recyclés étudiés.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'utilisation des agrégats récupérés d'ancien béton peuvent provoquer la chute de résistance d'un béton autoplaçants recyclé en comparaison avec un béton autoplaçants normal. Donc à titre d'amélioration de performances (rhéologiques, résistance et durabilité), on opte pour l'ajout de certaines types d'additions (fillers de calcaire et la fumée de silice) en combinaison avec les adjuvants super plastifiants.

Les résultats obtenus des tests sur des éprouvettes en BAP recyclés formulés en utilisant les deux types des fillers et après discussion ont permis les conclusions suivantes d'être tirées :

Les additions minérales jouent un rôle important dans l'amélioration des caractéristiques rhéologiques et des propriétés mécaniques des bétons autoplaçants recyclés.

L'augmentation du dosage en fillers de calcaire ou fumée de silice combiné augmente l'étalement, alors que l'augmentation du taux de filler calcaire seul au-delà de 5 % entraîne une diminution de l'étalement. Cette augmentation de l'ouvrabilité des **BAP (FS)** par rapport à celle des **BAP (FC)** peut être due aussi à la finesse de la poudre fumée de silice très importante. Cette finesse, améliore la granulométrie et la compacité par remplissage des vides entre les grains et contribue de manière significative à l'amélioration de la rhéologie et la stabilité des bétons. Cependant, à des taux élevés un effet inverse est constaté. Ce type d'additions (fumée de silice et calcaire) réduit la chaleur dégagée des matériaux cimentaires lors de l'hydratation et en accélère la formation des produits l'hydratation du C_3S , ce qui améliore les résistances aux jeunes âges; cet effet a tendance à se stabiliser à long terme. Ainsi, ceci diminue la fissuration d'origine thermique.

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

L'utilisation des fumées de silice et calcaire en différents pourcentages améliorent le comportement mécanique tel que (La traction par flexion, compression et module d'élasticité) grâce à leurs surface spécifique qui donne une meilleure adhérence entre les particules, ceci notamment, pour un dosage optimal combiné de (5 % Fumée de silice et 5 % Filler de Calcaire).

A titre de combinaison, les essais ultrason et scléromètre ont permis de réduire l'incertitude quant à l'évaluation de la résistance mécanique. L'augmentation de dosage de la fumée de silice donne une meilleure vitesse de propagation et indice sclérométique ; ce qui implique des BAP recyclés de bonne qualité par rapport à l'utilisation des fillers de calcaire.

L'ajout de fumée de silice augmente l'absorption de l'eau beaucoup plus que le filler de calcaire est ce pour tous les mélanges étudiés, le dosage optimal de 5 % combiné semble donner le plus faible taux d'absorption.

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

- Perspectives :

- Les travaux 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.
- Une investigation des propriétés des BAP recyclés basé sur la fumée de silice, peut constituer une forte contribution à la recherche dans le domaine de matériaux de construction.
- Sur le plan technique la poudre de la fumée de silice peut remplacer avec succès les fillers de calcaire dans les cas des BAP recyclés, une analyse de la micro-structure interne de la matrice cimentaire en utilisant des méthodes appropriées peut révéler de tels avantages (DRX, MEB, ATD et ATG).

- [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] Gadri.Attala, « *étude des caractéristiques physico-mécaniques des bétons de sable à base de fumée de silice* », thèse doctorat, université Mohamed K haider à Biskra, 2014.
- [15] Hermann Kurt, « *les ajouts : les fumées de silice* », Bulletin du ciment, Vol 63, 1995.
- [16] Patricia Bredy Tuffe, « *solutions de bétons* », 1^{er} édition, Paris, 2011.

- [17] Hannequart & E. Schamp, « *l'utilisation de granulats issus du recyclage* », MATRIciel 4^{ème} édition, Bruxelles, Décembre 2010.
- [18] Pierre Matar, « *caractéristiques du béton à base de granulats recyclés* », thèse doctorat, université Libanaise, September 2012.
- [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] Barkat Abderezzak, « *valorisation des déchets de briques dans la réalisation des ouvrages en béton* », mémoire magister, université Ourgla, November 2006.
- [21] Grondin Aurélie, « *étude des caractéristiques physique et mécaniques des bétons de granulats recyclés de béton* », mémoire de fin d'étude, INSA Strasbourg, 2011.
- [22] Ait Mohamed Amer Adem, « *valorisation des matériaux de démolition dans la construction* », thèse doctorat, université Hassiba Ben Bouali à Chlef, févéri 2017.
- [23] Mezghiche Bouzidi, « *norme, matériaux, melanges 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, page 63, 2000.
- [26] Notice technique, « *MEDAFLOW 30* », norme EN 934-2, société Granitex, Alger.
- [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} congrés français de mécanique, Lyon, 28 aout 2015.
- [30] Bellifa Soufyane, « *évaluation de la porométrie des pates 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* », thesé doctorat, Rencontres Universitaires de Génie Civil, France, May 2015.

Résumé

Cette étude a été menée pour répondre à deux préoccupations principales, la possibilité de formuler des BAP à base des matériaux locaux (granulats recyclés) et l'influence du dosage d'une addition de fumée de silice et fillers calcaire sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons autoplaçants.

L'objectif de ce projet de recherche du présent travail est d'optimiser la formulation de ces béton, par le choix approprié du type, la proportion de l'ajout afin d'améliorer les propriétés mécanique du béton autoplaçant et aussi de garder les bonnes propriétés rhéologiques du BAP (capacités de remplissage, de passage et la résistance à la ségrégation) parce que des études antérieures ont montré l'effet de ces additions minérale sur les caractéristiques de ce dernier. En premier lieu, l'effet des additions sur la maniabilité est à rechercher pour les divers essais rhéologiques. La deuxième étape, une emphase a été portée sur l'évaluation de la réponse mécanique (traction et compression) des BAP par utilisation de l'essai de l'écrasement à coté des essais non destructifs.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la fumée de silice seule ou combinée

avec du calcaire à un taux limité améliore la performance d'une façon remarquable des BAP recyclés à base de ces ajouts par rapport à un béton recyclé témoin (sans fillers).

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

Abstract

This study was undertaken to meet two principal needs, the possibility of formulating self compacting concrete (SCC) containing local materials (recycled aggregates). Also, to see the influence of the incorporation of mineral additions (limestone fillers and silica fume) on the rheological and mechanical behavior of the concretes SCC.

The objective of this research work is to optimize the formulation of these concrete, by an appropriate choice of the type, the proportion to be added in order to improve the mechanical properties of SCC mixes. Thus, to keep the good rheological properties of the SCC (fill capabilities, passing and segregation resistance) because studies earlier showed that the mineral additions effect on their characteristics

Firstly, we assess the effect on filler addition percentages on the handling and to look for relationships between various rheological tests. The second step an emphasis was brought on the evaluation of the mechanical response (flexural strength and compression) of the SCC by the use of the direct test next to the non-destructive testing methods (ultrasonic velocity and rebound hammer).

he results obtained showed that that such use of only silica fume or combined with limestone enhanced the performances in a good manner compared to reference concrete without addition, so we can say that a good formulation of SCC concrete based on these additions could be possible.

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

ملخص

هذه الدراسة تعتمد على شينين اساسيين هما امكانية وضع خرسانة ممزوجة انطلاقا من مواد محلية مثلا (حصى مستعملة) وتأثير الاضافات المعدنية (غبار السيلس' و غبار الكلس) على خصائص الريولوجية والمكانية لخرسانة ذاتية الوضع.

الهدف من هذا الدراسة هو استخراج النوع والنسبة المناسبة لتحسين الخصائص الميكانيكية للخرسانة ذاتية الوضع في نفس الوقت نحافظ على الخصائص الريولوجية للخرسانة (القدرة على المرور' المقاومة ضد الفصل) لان الدراسات السابقة اثبتت ان الاضافات المعدنية تؤثر على هذه الخصائص. وفي المرحلة الاولى نقيم تأثير الاضافات على قوام الخرسانة ونبحث على العلاقة بين مختلف التجارب الريولوجية, المرحلة الثانية تعتمد على تقييم الاستجابة الميكانيكية في (الشد و الضغط) للخرسانة ذاتية الوضع وذلك باستعمال تجارب الاتلاف و مقارنتها مع التجارب الغير اتلافية. النتائج المتحصل عليها من خلال استعمال غبارالسليوم سواء وحده او ممزوج مع غبار الكلس قد حسن من اداء الخرسانة بشكل ملحوظ مم يمكننا القول اننا تحصلنا على خليط مناسب لهذا النوع من الخرسانة.

المفاتيح : خرسانة ذاتية الوضع' غبارالسيلس' غبار الكلس' حصى مستعملة' الخصائص الريولوجية' المقاومة الميكانيكية.