

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi-BBA
Faculté des sciences et de la technologie
Département génie civil

جامعة محمد البشير الابراهيمي برج بوعريريج
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية



Mémoire de fin d'études

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux En Génie Civil

Thème :

**L'INFLUENCE DE LA VARIATION DU VOLUME DE PATE
ET SABLE FIN SUR <<BAP>>**

Présenté par : MEGUEDDEM Khansa

TOUABET Khaoula

Encadreur :

Mme. ROUBAH Souade

Soutenu le : 02-07-2018

Devant le jury :

Président : ACHOUR Yacine

MCA Université de BBA

Examineur : NOUI Ammar

MCA Université de BBA

Examineur : BOUGLADA Mohamed Salah

MAA Université de BBA

Année Universitaire : 2017/2018.

Remerciements

Après avoir rendu grâce à Dieu le Clément et le Miséricordieux de nous avoir données la force, le courage et la patience durant nos études pour arriver à ce jour - là, nous tenons à adresser en premier lieu nos vifs remerciements à notre encadreuse **Madame ROUABAH Souad**, Maitre-assistant A à l'Université Mohamed EL Bachir L'IBRAHIMI de Bordj Bou Arreridj, qui nous a proposées ce thème et nous a initiées dans cette voie de recherche. On avoue qu'elle a toujours été présente, compétente et surtout efficace dans sa supervision .qu'elle trouve ici l'expression de notre reconnaissance la plus dévouée.

Nos remerciements à tous les membres de jury qui ont accepté de juger notre travail. Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants de génie civil qui ont contribué à notre formation sans oublier **Mr KESSAL Oussama** pour son aide et **Dr. BELAGRAA larbi** pour ces conseils pertinents ainsi que le personnel du labo de génie civil pour leur collaboration et leur patience. Nous tenons à remercier le personnel du laboratoire **d'Ain EL-kebira Sétif** pour leur aide et bon accueil.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel.

Dédicace

Je dédie ce mémoire

A MA TRES CHERE MERE

Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie.

Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. J'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta confiance et tes sacrifices.

Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et Bonheur.

A MON TRES CHER PERE

De tous les pères, tu es le meilleur. Tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance et perfectionnisme. En témoignage de brut d'années de sacrifices, de sollicitudes, d'encouragement et de prières.

Pourriez vous trouver dans ce travail le fruit de toutes vos peines et tous de vos efforts. En ce jour, j'espère que j'ai réalisé l'un de tes rêves. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour.

Puisse Dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur.

A MA TRES CHER fille Maria *Puisse alleh te protéger, je te souhaite tout le bonheur de monde.*

ET mes frères, Anes, Sohaib, Haïthem et ma très cher sœur Isra.
TOUTES MES AMIES : Khawla, meriem, bouthayna, aya , khadidja , naanaa, et ftoume

Tous les étudiants de la promo Génie civil 2018

Dédicaces

A ceux qui sont toujours dévoués et sacrifiés pour moi ; ceux qui m'ont encouragée et soutenu à combattre les aléas de la vie, en témoignage de mon éternelle reconnaissance je dédie ce modeste travail a mes chers parent ;

A mes très chers frères :SAIFE eddine, kaïs, islem

A celui qui a su m'épauler, m'encourager et surtout être patient avec moi ; mon fiancé Hocine ; a qui je témoigne tendrement ma gratitude.

A mon binôme Khansa qui m'a accompagnée pendant le long de cette période pour réaliser ce mémoire ;

A tous ceux que j'aime et qui m'ont aidée de près ou de loin à accomplir ce modeste travail.

Sommaire

Introduction générale.....1-2

Chapitre I concept de béton autoplaçant

I.1. Introduction	3
I.2 Définition de béton auto plaçant	3
I.3. Historique de béton auto plaçant.....	Erreur ! Signet non défini.
I.4 Domaine d'utilisation des BAP.....	3
I.5. l'importance de l'utilisation des BAP dans la construction.....	5
I.6. Les exigences d'une formulation de B.A.P.....	6
I.7. Particularité structurale des BAP	6
I.7.1 Un volume de pâte élevé	7
I.7.2. Une quantité importante de fines.....	7
I.7.3. Un faible volume de gravillons	7
I.7.4. Utilisation de super plastifiant.....	7
I.7.5. L'utilisation d'agent de viscosité dans des cas particulier	9
I.8. Constituant du Béton Auto plaçant	9
I.8.1. Les granulates	10
I.8.2. Les additions minérales	10
I.8.3. Le ciment.....	15
I.8.4. L'eau.....	16
I.8.5. Les superplastifiants	16
I.9. Caractérisations des BAP à l'état frais.....	17
I.9.1. Mobilité en milieu non confiné (Essai d'étalement) :	18
I.9.2. Mobilité en milieu confine (Essai de la boîte en L) :	19
I.9.3. Stabilité (Essai de stabilité au tamis).....	19
I.9.4. Essai de ressuage	20
I.10. Caractérisation des BAP à l'état durci	21
I.10.1. Les essais de compression :	21
I.10.2. Les essais de traction par flexion.....	21
I.10.3 Les essais non destructifs	22

I.10.4. Essai d'auscultation sonique : [EN 12504-4]	22
I.10.5. Essai sclérométrique : [EN 12398]	24
I.11. Différentes types des méthodes :	25
I.11.1. Dosage des gravillons:	25
I.11.2. Dosage du sable:	26
I.11.3. Dosage du liant :	26
I.11.4. Dosage de l'eau et du super plastifiant :	26
I.12. Fabrication, transport et mise en place des BAP :	26
I.12.1. Fabrication des BAP	26
I.12.2. Transport des BAP	26
I.12.3. Mise en place des BAP :	27
I.13. Conclusion	27

Chapitre II Aperçu sur la rhéologie des BAP

II.1. Introduction	28
II.2. Notions générales	28
II.2.1. Ouvrabilité	28
II.2.2. Ecoulement permanent	28
II.2.3. Dilatance	29
II.2.4. Rhéologie	29
II.2.5. Contrainte de cisaillement τ	29
II.2.6. Seuil de cisaillement τ_0	29
II.2.7. Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$	30
II.2.8. Viscosité	31
II.2.9. Fluide newtonien	32
II.3. Notions générales sur le Comportement rhéologique des fluides	33
II.3.1. Lois de comportement rhéologique	33
II.3.2. Fluides visqueux	33
II.3.3. Fluides viscoplastiques	34
II.3.4. Fluides plastiques parfait	39
II.3.5. La thixotropie et anti thixotropie	39
II.3.6. Comportement rhéologique du béton frais	40
II.4. Rhéologie des bétons autoplaçants (BAP)	41
II.5. Caractérisation du comportement rhéologique des BAP	41

II.5.1. Influence des paramètres de formulation	42
II.6. Conclusion	43

Chapitre III Caractérisation des matériaux utilisé

III.1 Introduction:	49
III.1 Les matériaux utilisés :	49
III.2 Caractéristiques du sable utilisé :	49
III.2.1 Essai d'analyse granulométrique : [NF EN P18-650]	49
III.2.2 Caractéristiques physiques du sable utilisé :	51
III.2.3 Caractéristique chimique du sable :	54
III.3 Caractéristique du gravier utilisé :	55
III.3.1 Origine du gravier utilisé :	55
III.3.2 Analyse granulométrique :	56
III.3.3 Les caractéristiques physiques des graviers utilisés :	56
III.3.4 Les caractéristiques mécanique des graviers utilisés :	59
III.5 CIMENT :	61
III.5.1 Caractéristiques du ciment CEM II/B 42,5 :	61
III.6. Le Fillers de calcaire :	62
III.6.1 Caractéristique physique et chimiques du calcaire :	62
III.6. Poudre de céramique :	63
III.6.1 Caractéristique physique et chimique de la céramique:	63
III.8 Les Adjuvants :	64
III.8.1 Description :	64
III.8.2 Propriétés :	64
III.10. Formulation de béton auto plaçant par la méthode LCPC	64
III.10.1 Méthode française (LCPC)	64
III.11. Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC :	65
III.12 Procédure de fabrication des éprouvettes :	68
III.13 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais :	70
III.13.1 Essai au mini-cône (NF EN 1961)	70
III.13.2. Essai d'étalement au cône d'Abrams [NFEN12 350-8]	71
III.13.3 Essai de la boîte en « L »: [NF EN 12 350-10]	71
III.13.4 Essai de stabilité au tamis: [NF EN 12 350-11]	71

III.13.5 Essai Rhéomètre.....	72
III.14 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci :.....	72
III.14.1 Essai compression [EN 206-1] :	72
III.14.2 Essais traction par flexion : [NF EN P 18-408]	73
III.14.3 Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NA EN 12504-2]	74
III.14.4 Ultrason [NA EN 12504-4].....	75
III.15. Confection des éprouvettes :	75
III.15.1 Type et tailles des moules :	75
III.15.2 Conservation des éprouvettes :	76
III.16 Conclusion :	77
<u>Chapitre IV Résultat et Interprétation</u>	
IV.1. Introduction	78
IV.2 Les formulations des bétons réalisés sont les suivantes :.....	78
IV.3 Présentation de résultats :	78
IV.3. Le béton autoplaçant à l'état durci	92
IV.3.1 Béton autoplaçant avec ajout 10%FC+2%PC :	92
IV.4 Essais non destructifs (END)	98
IV.5 Conclusion.....	101
Conclusion générale	103_104

Chapitre I : Revue bibliographique

Figure I.1 : Le pont Akashi Kaikyo.....	4
Figure I.2 : La tour Landmark Tower	4
Figure I.3 Exemple d'un coulage d'une dalle en béton autoplaçant.....	5
Figure I.4. Comparaison entre une composition de BAP et d'un Béton ordinaire...	6
Figure I.5. Action des superplastifiants- Défloculation des grains de ciment.....	7
Figure I.6. Influence de la qualité du super plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton.....	7
Figure I.7. : Diagramme de remplissage et risque de ségrégation.....	9
Figure I.8. Effet du dosage en filler calcaire sur l'écoulement en fonction du rapport E/C du mortier.....	11
Figure I.9. La structure d'assemblage des particules de céramique.....	12
Figure I.10. Fabrication à partir d'un moule en plâtre.....	14
Figure I.11. Actions des superplastifiants.....	16
Figure I.12. Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).....	17
Figure I.13. Essai de la boîte en L (L-box test).....	18
Figure I.14. Essai de stabilité au tamis.....	19
Figure I.15. Essai de ressuage	20
Figure I.14. Détérioration d'un béton par des cycles gel-dégel.....	23
Figure I.15. La relation entre la résistance à la compression et l'indice de Rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides.....	24

Chapitre II : rhéologie de BAP

Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. 1. a) Schématisation du comportement rhéologique d'un corps newtonien.	
(b) Mouvement de cisaillement d'un système plaque-plaque.....	32
Figure II.2. Schéma de la vitesse de cisaillement.....	33
Figure II.3. Glissement de couches.....	35
Figure II.4 Les types de comportement rhéologique.....	36
Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. 2. Modèle Herschel-Bulkley en variant c et τ	40
Figure II.3 le corps thixotropique.....	42
Figure II.4 Système présentant une anti thixotropie.....	42
Figure II.8. Rhéogramme illustrant l'influence de SP sur les propriétés rhéologiques des	

Chapitre 04 : Résultat et interprétation

Figure IV.1 : l'étalement en fonction de type de béton 2%PC.....	88
Figure IV.2 : Le taux de remplissage en fonction du type de béton 2%PC.....	88
Figure IV.3 : L'indice de ségrégation en fonction du type de béton 2%PC.....	88
Figure IV.4 : l'étalement en fonction de type de béton 7%PC.....	89
Figure IV.5 : Le taux de remplissage en fonction du type de béton 7%PC.....	89
Figure IV.6 : L'indice de ségrégation en fonction du type de béton 7%PC.....	90
Figure IV.7 : l'étalement en fonction de type de béton 14%PC.....	91
Figure IV.8 : Le taux de remplissage en fonction du type de béton 14%PC.....	91
Figure IV.9 : L'indice de ségrégation en fonction du type de béton 14%PC.....	91
Figure IV.10 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{T1}	92
Figure IV.11 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{T2%}	92
Figure IV.12 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{T7%PC}	93
Figure IV.13: Courbe d'écoulement des points de BAP _{T14%PC}	93
Figure IV.14 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{2%PC+5S}	93
Figure IV.15 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{2%PC-5S}	93
Figure IV.16 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{2%PC+7S}	93
Figure IV.17 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{2%PC-7S}	94
Figure IV.18 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{7%PC+5S}	94
Figure IV.19 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{7%PC-5S}	94
Figure IV.20 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{7%PC+7S}	94
Figure IV.21 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{7%PC-7S}	94
Figure IV.22: Courbe d'écoulement des points de BAP _{14%PC+5S}	94
Figure IV.23 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{14%PC+7S}	95
Figure IV.24 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{14%PC-7S}	95
Figure IV.25 : Courbe d'écoulement des points de BAP _{14%PC-5S}	95
Figure IV.26 valeurs de la viscosité des différents BAP avec 2% PC.....	96
Figure IV.27 valeurs de la viscosité des différents BAP avec 7% PC	96
Figure IV.28 valeurs de la viscosité des différents BAP avec 14% PC	97
Figure IV.29. Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton BAP 2%PC	99
Figure IV.30 : Évolutions de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge	

du bétonBAP2%PC.....	100
Figure IV.31 : Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du bétonBAP7%PC.....	101
Figure IV.32 : Évolutions de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du bétonBAP7%PC.....	103
Figure IV.33 : Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du bétonBAP14%PC.....	104
Figure IV.34 : Évolutions de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du bétonBAP14%PC.....	105
Figure I.V.35: Evaluation de la résistance avec sclérométrie pour les BAP2%PC	107
Figure IV.36: Evaluation de la résistance avec ultrason en fonction du type de BAP2%PC.....	107
Figure I.V.35: Evaluation de la résistance à 28j avec sclérométrie pour les BAP7%PC	108
Figure IV.36: Evaluation de la résistance avec ultrason en fonction du type de BAP7%PC.....	108
Figure I.V.35: Evaluation de la résistance à 28j avec sclérométrie pour les BAP14%PC	109
Figure IV.36: Evaluation de la résistance avec ultrason en fonction du type de BAP14%PC.....	109

Liste des tableaux

Chapitre 2 : caractérisation des matériaux utilisés

Tableau III.1 : Analyse granulométrique de sable.....	57
Tableau III.2 : Classification de sable en fonction du module de finesse.....	58
Tableau III.3 : La masse absolue de sable.....	58
Tableau III.4 : La masse volumique apparente de sable.....	59
Tableau III.5 : Porosité, compacité et indice des vides.....	59
Tableau III.6 : La classification de la nature sable en fonction d'ES.....	62
Tableau III.7 : Équivalent de sable.....	62
Tableau III.8 : Composition chimique de sable.....	63
Tableau III.10 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	64
Tableau III.11 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.....	64
Tableau III.12 : Masse volumique apparente du gravier.....	66
Tableau III.13 : La masse volumique absolue du gravier.....	66
Tableau III.14 : Porosité, compacité et l'indice des vides.....	67
Tableau III.15 : l'absorption d'eau de gravier.....	67
Tableau III.16 : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	69
Tableau III.17 : Classification des roches en fonction du coefficient L_A	69
Tableau III.18: Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5.....	70
Tableau III.19 : Les compositions chimique du CEM II/B 42.5	70
Tableau III.20 Les composition minéralogique du ciment CEM II/B 42.5	70
Tableau III.21: La composition chimique et les propriétés physiques du filler calcaire....	71
Tableau III.22: La composition chimique et les propriétés physiques de la poudre de céramique.....	72
Tableau III.23 : Caractéristique de l'adjuvant« MEDAFLOW 30 ».....	72
Tableau III.24 : Propriétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci.....	73
Tableau III.25: Analyse chimique de l'eau utilisée.....	73
Tableau III.26: Dosage de superplastifiant de la masse de ciment et filler.....	74
Tableau III.27 composition d'un mètre cube de BAP formulé par la méthode LCPC.....	76
Tableau III.28 Composition des bétons témoin pour confection 36 l en Kg	76
Tableau III.29 composition d'un mètre cube de BAP 2% Céramique formulé par la méthode LCPC.....	77
Tableau III.28 Composition des différents bétons pour confection 36 l en Kg.....	78

Chapitre 4: résultat et interprétation

Tableau IV.1 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 2% poudre de céramique et filler calcaire ; et différent pourcentage de sable..... 87

Tableau IV.2 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 7% poudre de céramique et filler calcaire ; et différent pourcentage de sable..... 89

Tableau IV.3 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 14% poudre de céramique et filler calcaire ; et différent pourcentage de sable..... 90

Tableau IV.4 caractéristique rhéologie des différents BAP 2% PC mesurées par rhéomètre..... 95

Tableau IV.5 : caractéristique rhéologie des différents BAP mesurées par rhéomètre..... 96

Tableau IV.6 : caractéristique rhéologie des différents BAP mesurées par rhéomètre..... 97

Tableau IV.7 : Caractéristiques mécaniques avec ajout 10% FC + 2% PC (compression). 99

Tableau IV.8: Caractéristiques mécaniques avec ajout 10% FC + 2% PC flexion... 100

Tableau IV.9 : Caractéristiques mécaniques avec ajout 10% FC + 7% PC compression..... 101

Tableau IV.10 : Caractéristiques mécaniques avec ajout 10% FC + 7% PC (flexion) 102

Tableau IV.11 : Caractéristiques mécaniques avec ajout 10% FC + 14% PC (compression)..... 103

Tableau IV.12 : Caractéristiques mécaniques avec ajout 10% FC + 14% PC (flexion)..... 105

Tableau IV.13 : Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP 2% pc étudiés à 28 jours..... 106

Tableau IV.14 : Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP 7% PC étudiés à 28 jours..... 107

Tableau IV.15 : Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP 14% PC étudiés à 28 jours..... 109

Acronymes

MF : Module de finesse

Symboles

τ : La contrainte de cisaillement

τ_0 : Le seuil de cisaillement

μ : la viscosité plastique

$\dot{\gamma}$: Le gradient de vitesse

γ : La masse volumique apparente

ρ : La masse volumique absolue ou spécifique

P : La porosité

C : La compacité

e : L'indice des vides

R_b : la valeur de la résistance du béton

C : ciment

G : gravier

S : sable

E : eau

R_c : résistance à la compression

F : la charge de rupture.

S : section de l'éprouvette.

PC : Poudre de céramique

BAP : Béton autoplaçante

Introduction générale

Le béton autoplaçant caractérisé par une grande fluidité, est un béton qui se met en place sans aucune vibration même dans des endroits très encombrés par le ferrailage et cela tout en préservant une bonne homogénéité jusqu'à sa durabilité. La grande maniabilité des BAP assure la fabrication d'ouvrages duquel la finition est toujours d'une bonne qualité. Cette fluidité peut être obtenue par l'utilisation de superplastifiant.

Les bétons autoplaçants (BAP), développés depuis les années 80, sont encore à l'heure actuelle qualifiés de nouveaux bétons est bien qu'ils connaissent développement très appréciable. Les bétons autoplaçants se différencient de béton ordinaire par l'utilisation de fortes quantité en additions minérales, et superplastifiant.

Ces bétons se distinguent également par leurs propriétés à l'état frais et leur mode de mise en œuvre [1].

Problématique

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

Dans cette étude on s'intéresse au comportement des bétons autoplaçants composés d'un volume de pate élevé et ce en étudiant l'influence du dosage des différents composants des pâtes, notamment le dosage en poudre de céramique (2% ; 7% ; 14%) et la variabilité granulométrique du sable en faisant changer sa teneur en particules fines, sur leurs comportements rhéologiques (étalement, seuil de cisaillement et viscosité plastique).

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

Structure de mémoire :

Ce mémoire est composé d'une introduction générale et de quatre chapitres structurés comme suivants :

Chapitre I :

Consacré :

- ✓ aux connaissances actuelles des propriétés des BAP et les méthodes de caractérisation des différentes propriétés de ces bétons.
- ✓ Des notions générales sur les filler de calcaire et poudre de céramique et leur influence sur les bétons spécialement le BAP.
- ✓ Des Notions généralités sur les essais destructifs et non destructifs.

Chapitre II

Étudie la conception de base de la rhéologie avec les définitions des paramètres rhéologiques et des types de comportement rhéologique, ainsi que l'influence des constituants du mélange sur la rhéologie du béton frais.

Chapitre III :

Consacré à une étude expérimentale en se basant sur la caractérisation des matériaux, outils et méthodes utilisés pour la réalisation de cette étude. Un rhéomètre ICAR est utilisé pour déduction des paramètres rhéologiques.

Chapitre V :

Expose les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations.

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

CHAPITRE I

CONCEPT DES BETONS AUTOPLAÇANTS

I.1. Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP) ont été développés pour la première fois au Japon dans les années 80 pour répondre aux exigences de la construction comme l'ouvrabilité et le manque de mains d'œuvre, et afin d'assurer régulièrement une mise en place correcte avec un béton de qualité. Ces bétons se développent maintenant dans le monde entier dans de nombreuses applications et peuvent remplacer entièrement les bétons ordinaires dans le futur proche. Jusqu'à présent les BAP ont été formulés avec plusieurs matériaux de construction, normalisés ou avec des matériaux recyclés mais leur cahier de charges nécessite plus de prudence lors de leur formulation comparable au béton classique qui a une formulation plus simple et le changement de matériaux et des constituants nécessite plus d'expérimentation afin de prouver leurs validités [1].

I.2 Définition de béton auto plaçant

Par béton auto plaçant (BAP), on désigne un béton très fluide, très déformable, stable et mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuant par le seul effet gravitaire). Il confère à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant au béton classique mis en œuvre par vibration, il garantit à la structure la résistance et la durabilité. Par définition, les BAN (Bétons Auto-Nivelant) constituent une famille de BAP correspondant aux applications horizontales (dallage, planché...etc.).

I.3. Historique de béton auto plaçant

Les chercheurs K. OZAWA ET K. MAEKAWA de Université de Kochi (Tokyo) ont développé le premier prototype de BAP pendant l'été de 1988. Ces résultats ont été présentés par K. OZAWA pour la première fois au 2ème Congrès de l'Asie de l'Est et Pacifique sur le Génie Civil et la Construction, tenu en Janvier 1989 à Chiangmai (Thaïlande). Trois années plus tard, en Mai 1992, au 4ème Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention du K. Ozawa a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton. [2]

I.4 Domaine d'utilisation des BAP

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

La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

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

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

A titre d'exemple, nous citons quelques réalisations avec les BAP :

Le pont Akashi Kaikyo (Figure 1), le plus long pont suspendu au monde (3919m) ou 390 000 de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration. [3]



Figure I.1 : Le pont Akashi Kaikyo [3].

La tour Landmark Tower (figure I.2), ou un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune.



Figure I.2 : La tour Landmark Tower [3].

I.5. l'importance de l'utilisation des BAP dans la construction

Le béton auto plaçant, BAP, est connu par sa fluidité très élevée et son homogénéité, qui lui permet de se mettre en place sous le seul effet de la gravité. Okamura et Ouchi sont les premiers qui ont contribué au développement de ce type de béton dont leurs premiers objectifs étaient d'assurer ces deux qualités d'ouvrabilités [2]. Après, plusieurs chercheurs dans le reste du monde ont mené des travaux expérimentaux selon les exigences de leur pays et leur exigence de construction. Comparable au béton ordinaire, les BAP révèlent plusieurs avantages à la fois techniques et socio-économiques :

- Construction d'éléments de structure qui ont des formes plus complexes.
- Améliorer la qualité des parements et la forme finale des surfaces.
- Coulage dans un milieu fortement ferraillés avec une capacité de remplir tous les coins.
- Facilité de mise en œuvre avec la possibilité de couler dans un seul point et d'utilisation d'une pompe.
- L'élimination des effets sonores nuisibles dues à la vibration.
- Réduction du temps de réalisation globale.
- Son utilisation au génie civil permet plus de Liberté de conception.

La figure I.3 montre un coffrage ferraillé, dans ce cas il faut assurer que le béton présente une déformabilité et une résistance à la ségrégation maximale.



Figure I.3 Exemple d'un coulage d'une dalle en béton autoplaçant [4]

I.6. Les exigences d'une formulation de BAP

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires par leur comportement à l'état frais.

- Un BAP doit avoir un écoulement sous son poids propre, et pour assurer ça il doit avoir une vitesse d'étalement importante.
- Assurer une bonne homogénéité et propriétés mécaniques.
- Le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zone inférieure de l'élément [5].

I.7. Particularité structurale des BAP

Les constituants utilisés dans la formulation des bétons autoplaçants sont les mêmes que pour des bétons ordinaires, mais la différence est en proportions et en nombre par deux éléments supplémentaires comme il est montré dans la figure I.4

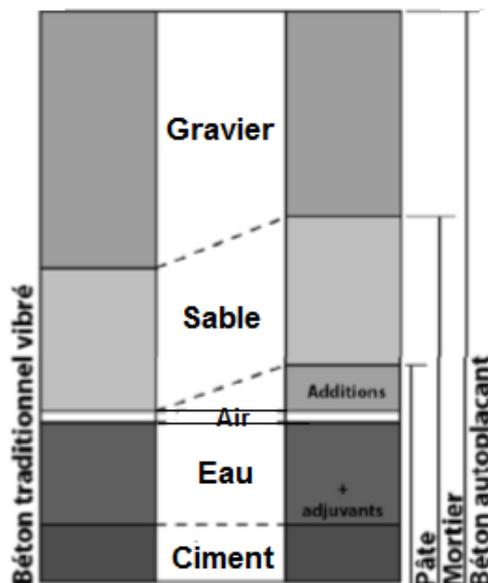


Figure I.4. Comparaison entre une composition de BAP et d'un Béton ordinaire [6].

I.7.1 Un volume de pâte élevé

Il faut maintenir un volume important de pâte pour limiter les frottements entre granulats. Le rôle de la pâte (ciment + addition + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m³). [7]

I.7.2. Une quantité importante de fines

D'après AFGC [7], les BAP intègrent dans leurs formulations une certaine quantité de fines de l'ordre de 500 kg/m³, pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage. [7]

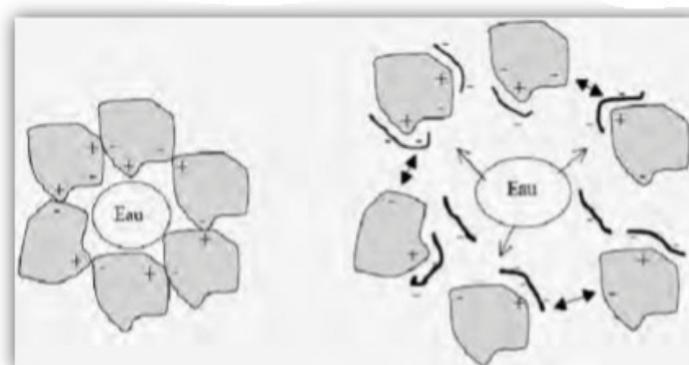
I.7.3. Un faible volume de gravillons

Les gros granulats sont à l'origine des blocages du béton en zone confinée, c'est la raison pour laquelle leur volume est limité dans les BAP. Il y a deux facteurs à prendre en compte pour les B.A.P. Un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 0.9 et le diamètre maximal des gravillons (D max) dans un B.A.P. compris classiquement entre 10 et 20mm [7].

I.7.4. Utilisation de super plastifiant

L'apparition des bétons auto plaçant et des bétons à Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants(SP). L'action principale des super plastifiants est de défloculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure I.5). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles [8].

Figure I.5. Action des superplastifiants- Défloculation des grains de ciment [9]



L'ajout d'un superplastifiant aide à augmenter la fluidité. La Figure I.6 montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiants [10].

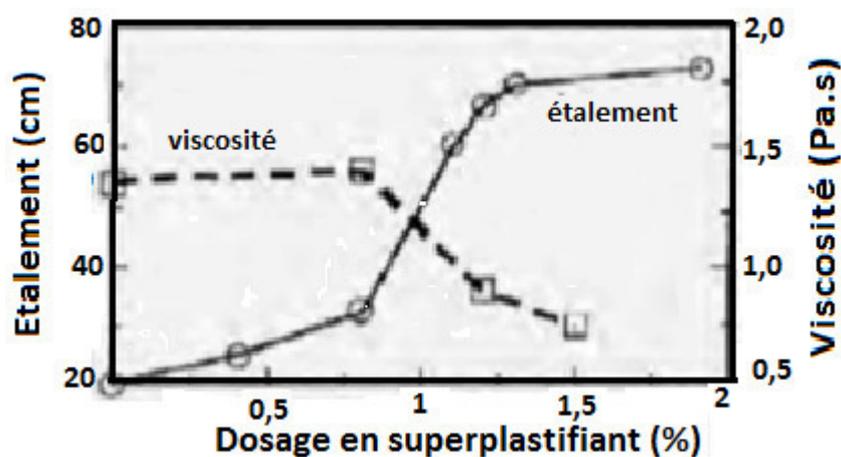


Figure I.6. Influence de la qualité de super plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [9]

Flatt et Houst [9] définissent l'action des superplastifiants en trois mécanismes :

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

Ces auteurs [9] montrent qu'une couche de gel ou de monosulfo-aluminate (AFm) peut se former autour du ciment ce qui augmente la surface que doit recouvrir le super plastifiant pour disperser les grains. Donc, plus le ciment est réactif plus la quantité de polymère à ajouter sera importante. Sugamata et al. [9] ont étudié l'influence de différents superplastifiants et de leurs dosages sur le maintien rhéologique dans le temps d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage de superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur.

Cette caractéristique est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange. Actuellement, les superplastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation. Différents auteurs [9] ont montré que le moment d'introduction du super plastifiant lors du malaxage joue un rôle sur le dosage à saturation. Si l'introduction est retardée, le dosage à saturation est plus faible, et il est obtenu pour une plus faible quantité de superplastifiants, car si l'hydratation du ciment est amorcée alors la consommation de superplastifiants par les hydrates sera moins importante [9]. Ainsi, le fait de retarder son introduction, permet au super plastifiant d'être plus efficace et d'obtenir des mélanges plus fluides que s'il avait été introduit en début de malaxage. Les BAP contiennent des

superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation [9]) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Il est possible d'utiliser un plastifiant en synergie avec un super plastifiant.

I.7.5. L'utilisation d'agent de viscosité dans des cas particulier

Les agents de viscosité sont utilisés essentiellement pour améliorer la cohésion et la stabilité des mélanges de béton [7]. Notamment lorsque ce dernier est coulé sous l'eau.

I.8. Constituant du Béton Auto plaçant

Chaque formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chaque constituant joue un rôle différent dans l'écoulement et surtout dans le comportement rhéologique du béton.

I.8.1. Les granulats

Certain auteur [11]. [12] Montrent que la quantité de gros granulats a une grande influence sur la capacité du béton à passer au travers des armatures. Moins il y a de gros granulats, plus la capacité de remplissage est élevée. Généralement, les gravillons augmentent la compacité granulaire du squelette ce qui permet de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir les caractéristiques rhéologiques et mécaniques voulues [13]. Il s'agit donc de trouver un arrangement lors de la formulation du matériau. Généralement concernant les BAP le diamètre maximal des granulats est limité à 20 mm cela pour éviter le problème de blocage [7].

Les travaux de Jin [15] affirment que la quantité de sable incluse dans le mortier doit être vérifiée. Leurs essais montrent que le rapport ($V_{\text{sable}}/V_{\text{mortier}}$) doit être supérieur à 50%. Selon AFGC].

L'utilisation d'un rapport ($V_{\text{gravillons}}/V_{\text{sable}}$) (G/S) de l'ordre de 0.9. La répartition granulaire reste toujours importante. Il est donc nécessaire de maîtriser l'influence des différentes fractions granulaires les unes par rapport aux autres. D'après Larrard [13], la distribution granulaire doit être bien équilibrée pour éviter les risques de ségrégation.

La figure I.7. Présente différents diagrammes de remplissage et les risques de ségrégation du mélange ;

a : mélange stable.

b : risque de ségrégation par un excès de gravillons.

c : risque de ségrégation par un excès de fluidité et manque de continuité dans la courbe granulométrique.

d : risque de ressuage par manque d'éléments fins.

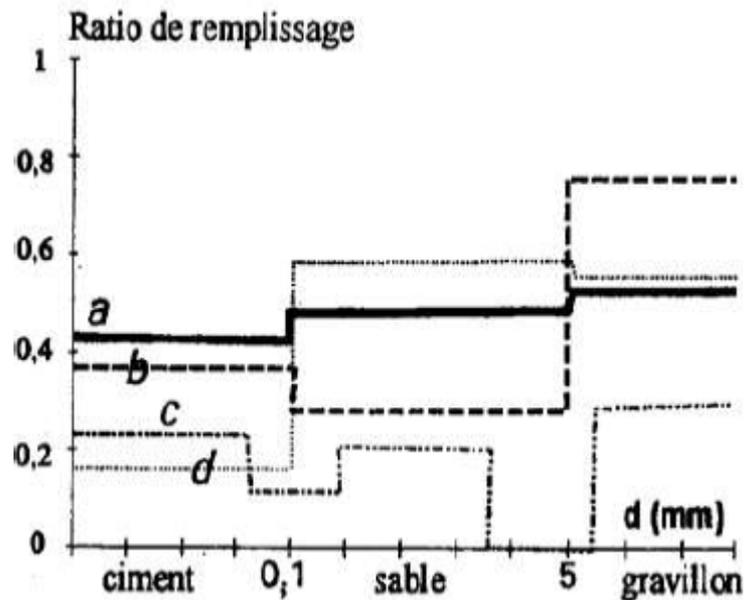


Figure I.7. : Diagramme de remplissage et risque de ségrégation [13] Cité par [14]

I.8.2. Les additions minérales

Les additions minérales sont des produits qui ont des dimensions inférieures à 80 μ m. Récupérées des déchets des centrales thermiques ou pulvérisation de certaines roches par broyage. pour l'amélioration de propriétés rhéologiques des BAP, l'addition des fines inertes ou réactives est nécessaire, ainsi que leurs présence peut remplacer une quantité de ciment dans la formulation et réduit la chaleur d'hydratation ce qui réduit le retrait endogène [16].

I.8.2.1. Filler calcaire

Le filler calcaire largement utilisé dans les bétons auto plaçant. Les résultats de Nehdi [17] montrent que la substitution de ciment par le filler calcaire conduit à la réduction du seuil de cisaillement et aussi l'augmentation de la viscosité plastique. les résultats de Yahia et al [18] affirment que l'ajout du filler calcaire pour un dosage constant en ciment diminue la viscosité d'une pâte de ciment et cela malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides. El Hilal et al [19] rapportent que l'influence des fillers calcaires sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais. les compositions ont été réalisées avec une teneur en eau constante, le rapport eau/ciment constant, un rapport G/S=1 et un dosage en super plastifiant différent. La teneur en fines est constante avec trois types de fillers calcaires différents. Les résultats conduits sur les BAP montrent que

l'influence de la variation du volume de pâte et le sable fin sur un BAP

l'ajout de fillers ayant une grande surface de Blaine améliore la fluidité du BAP. Les auteurs [20] ont étudié l'influence de différent type de filler calcaire. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisé n'a pas d'efficacité sur l'étalement et ce pour deux type de super plastifiants. En revanche, leur étude sur bétons montre que le type de filler a une forte influence sur la demande en super plastifiant pour obtenir un étalement donné. Les fillers à base de craie demandent plus d'adjuvant que les fillers calcaires, plus il y a de filler au lieu du ciment, moins il faut de super plastifiant pour atteindre un étalement donné. Yahia et al [18] ont étudié l'influence du dosage en filler calcaire de surface spécifique de $4800\text{m}^2/\text{kg}$ avec trois rapport différents de E/C (0,35 ; 0,40 et 0,45) sur l'étalement relatif et la vitesse relative d'écoulement d'un mortier, leurs résultats sont présentés sur la figure I.8.

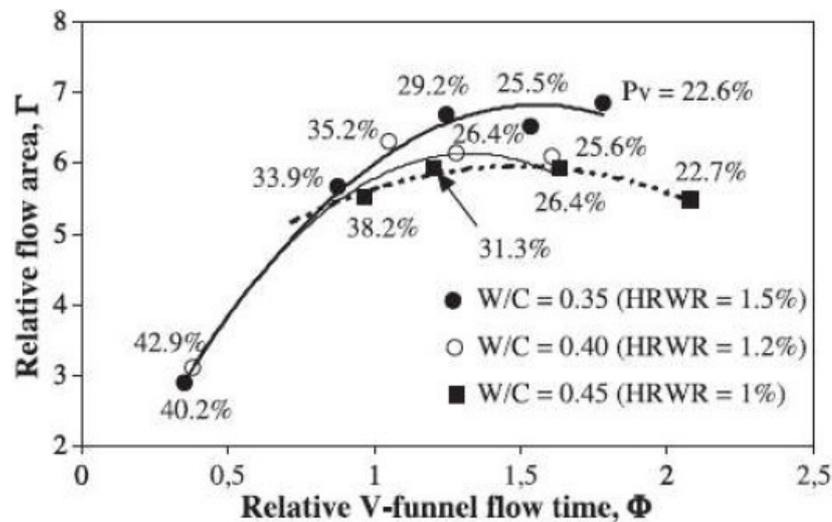


Figure I.8. Effet du dosage en filler calcaire sur l'écoulement en fonction du rapport E/C du mortier [18]

I.8.2.2.Céramiques

La définition de céramiques varie selon le contexte d'emploi. Certains incluront des matières composées de deux éléments dont un métal comme le sel (NaCl), des composées de deux éléments non métalliques (comme le verre SiO_2), ou des matières pures comme le silicium (Si) ou le diamant (C).

Parmi les produits que nous considérerons à base de céramiques, on cite : la vaisselle, les produits sanitaires (toilettes, bidets, lavabos, etc.), les poteries, les isolateurs électriques, etc.

I.8.2.2.1. Structure

Les céramiques sont composées d'oxydes métalliques, comme l'alumine (Al_2O_3), liés entre eux par frittage à partir de liens ioniques. Les céramiques sont donc des matériaux cristallins.

Le point de fusion (plus de 2000°C) étant trop élevé et le matériau étant trop fragile toute mise en forme par moulage, forgeage ou laminage est impossible dans un contexte industriel. Le frittage est donc la seule méthode pour assembler des particules de céramique entre elles. [21]

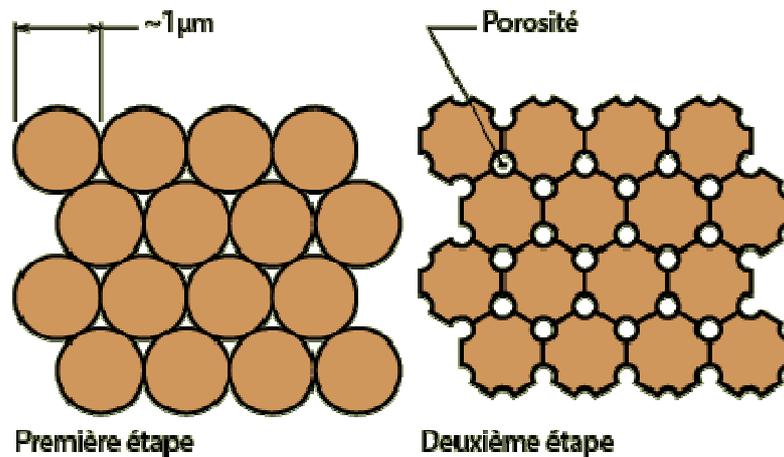


Figure I.9. La structure d'assemblage des particules de céramique. [21]

Le frittage est exécuté en deux étapes. Premièrement, on agglutine entre elles de fines particules de céramique (par compression ou par élimination de l'eau d'un mélange de particules de céramique et d'eau). Deuxièmement, on chauffe la pièce à des températures plus ou moins élevées (900° à 1300°C pour les céramiques traditionnelles et 1250° à 2600°C pour les céramiques techniques) pour créer des liens (sans fusion) entre les particules. Dans les faits, le lien qui unit les particules des céramiques traditionnelles est aussi créé par la fusion de silice incorporée dans les mélanges quand le tout est exposé à la chaleur. On parle alors de cuisson plutôt que de frittage.

I.8.2.2. Propriétés générales des céramiques

Les céramiques sont des matériaux qui ont généralement les propriétés suivantes :

- ❖ Mauvais conducteurs de chaleur ;
- ❖ Mauvais conducteurs d'électricité ;
- ❖ Température de fusion élevée ;

- ❖ Rigidité élevée ;
- ❖ Faible résistance en tension (matériau fragile) ;
- ❖ Très résistant à la corrosion ;

I.8.2.3. Céramiques traditionnelles (céramiques vitrifiées)

Les céramiques traditionnelles sont obtenues par la mise en forme à l'état plastique par addition d'eau et ensuite cuisson (frittage et fusion de silice). L'argile est une des principales matières constituant les céramiques traditionnelles. Le feldspath (un fondant) est ajouté aux meilleures qualités de céramiques.

I.8.2.4. Céramiques techniques

Les céramiques techniques se distinguent des céramiques traditionnelles par une température de mise en forme plus élevée, un contrôle plus précis des éléments constituant et des procédés de mise en forme particuliers et plus rigoureux.

I.8.2.5. Classification des céramiques

Les céramiques sont classées selon les qualités suivantes (de la plus artisanale aux plus avancés) :

- Terre cuite (Briques, tuiles, poteries, conduits de fumée, tuyau de drainage, etc.) ;
- Faïence (Équipement sanitaire, vaisselle, carreaux, etc.) ;
- Grès (Carreaux de sol, appareil de chimie, équipement sanitaire, etc.) ;
- Porcelaine (Vaisselle, appareil de chimie, isolateur électrique, etc.);
- Produits réfractaires (application dans l'industrie thermique, etc.);
- Céramiques techniques avancées (composant semi-conducteur, outils de coupe, pièces chaudes de moteurs, etc.).

Alors que la terre cuite demande une température de cuisson de 900° à 1000 °C (on ne parle pas ici de frittage proprement dit parce que d'autres phénomènes, comme la fusion de certains éléments, prennent une part importante du processus avant la solidification), les céramiques techniques avancées demandent des températures de frittage pouvant aller jusqu'à 2600 °C. La porcelaine est la meilleure qualité de céramiques traditionnelles. Sa température de cuisson oscille entre 1100° et 1300 °C et les principaux matériaux qui la constituent sont le kaolin, l'argile blanche, le feldspath et le quartz. [21]

I.8.2.6. Mise en forme des céramiques

Avant l'opération de cuisson ou de frittage, la matière est d'abord mise en forme. Cela peut être fait par évaporation de la barbotine dans un moule de plâtre (voir illustration), par compression, etc. La matière doit avoir suffisamment de consistances pour tenir en forme. Pendant le séchage, une pièce subira un retrait important (3 % pour la porcelaine, mais ce pourcentage peut varier de façon importante selon la méthode de mise en forme). Selon le procédé de mise en forme, ce retrait peut-être isotrope ou anisotrope. Après l'opération de cuisson ou de frittage, l'objet subira un autre retrait (13 % dans le cas de la porcelaine). Il est donc normal d'avoir un retrait total de plus de 16 % [21].

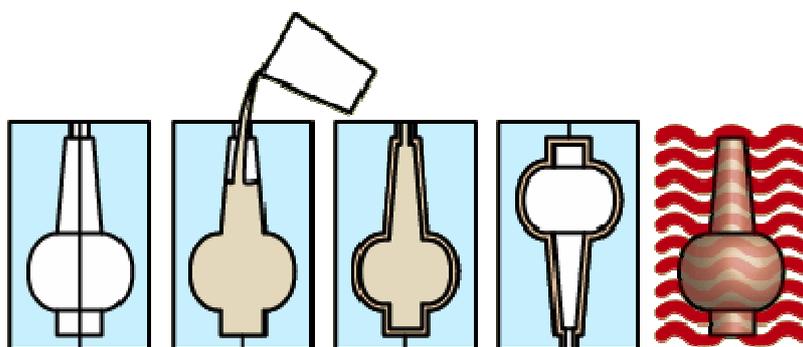


Figure I.10. Fabrication à partir d'un moule en plâtre [21]

I.8.3. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse. Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20% [9] Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont :

- Le silicate tricalcique, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, que l'on écrit C3S ;
- Le silicate bicalcique, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, que l'on écrit C2S ;
- L'aluminate tricalcique, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, que l'on écrit C3A ;
- L'aluminoferrite tétracalcique, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, que l'on écrit C4AF.

Suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, le clinker est constitué de 62 % à 67 % de chaux combinée (CaO), de 19 % à 25 % de silice (SiO₂), de 2 % à 9 % d'alumine (Al₂O₃), et de 1% à 5 % d'oxyde de fer (Fe₂O₃). Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, hélihydrates, anhydrite) et d'additifs[9] Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton auto plaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts. [9]

I.8.4. L'eau

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

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

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

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

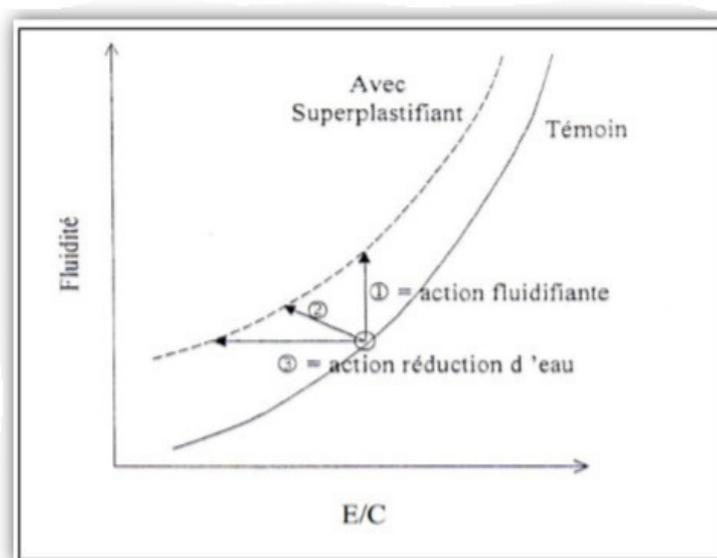
La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevées et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue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

I.8.5. Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2% environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Le béton est un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d'eau et ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d'eau introduite lors du gâchage. L'utilisation de super plastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation. [9]

Les superplastifiants permettent de répondre à deux types d'applications, selon que l'utilisateur travaille dans le domaine de la préfabrication ou du béton prêt à l'emploi. Dans le premier cas, il aura besoin d'un béton qui acquiert des propriétés mécaniques importantes de façon très rapide afin de procéder au démoulage dans les délais les plus brefs et en même temps d'un béton assez fluide pour avoir une mise en place convenable dans les moules. Dans le deuxième type d'utilisation, le béton devra pouvoir être transporté sur des parcours plus ou moins longs et présenter de bonnes propriétés de mise en œuvre sur le site de construction sans que les performances mécaniques ne soient affectées. [9]

Il apparaît donc que les bétons modernes doivent satisfaire à la fois aux exigences de résistance et de maniabilité. Il s'agit de deux caractéristiques apparemment inconciliables puisque sans l'ajout de super plastifiant, l'augmentation des résistances ne s'obtient qu'avec une réduction d'eau. Or, une réduction d'eau diminue la fluidité. Un gain de maniabilité ne peut être obtenu qu'en augmentant la quantité d'eau de gâchage et donc au détriment des résistances finales du matériau. [9] L'utilisation de superplastifiants dont l'action est schématisée sur (Figure I.9) permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques



du matériau.

Figure 1.11. Actions des superplastifiants [9]

- augmentation de la fluidité (teneur en eau égale).
- diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité.

- diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

I.9. Caractérisations des BAP à l'état frais

En France, trois essais de caractérisation des bétons auto plaçant à l'état frais ont été recommandés par l'Association Française de Génie Civil « AFGC » en juin 2000 [22]. Initialement provisoires, ces recommandations sont devenues par la suite des essais de référence pour valider une formule de BAP.

L'ouvrabilité des bétons auto plaçant se décompose en trois caractéristiques ;

- La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement) ;
- La mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L) ;
- La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

I.9.1. Mobilité en milieu non confiné (Essai d'étalement) :

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, il permet de mesurer la consistance d'un béton. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Figure-1.12). Cependant l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Une observation permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai réalisable sur chantier ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. Une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP. [22]

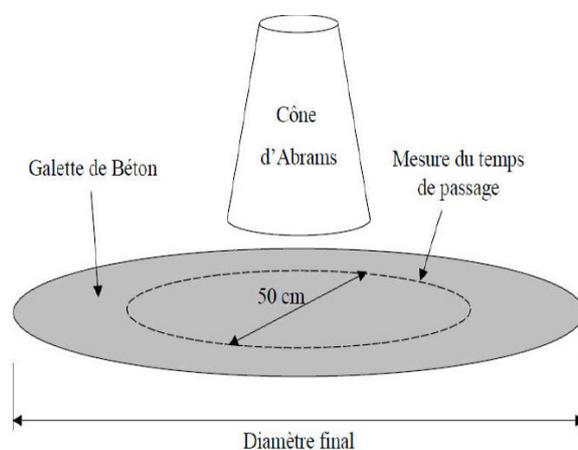


Figure I.12. Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)[5]

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons auto plaçant :

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette,
- En traçant à la truelle des lignes dans la « galette », on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement,
- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètres 50 et 60 cm durant un écoulement au cône,
- Une forme bombée de la « galette » traduit un effet de voute, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton.

Toutes ces indications sont plus ou moins subjectives mais aident le formulation expérimenté à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond plus à ses attentes.

I.9.2. Mobilité en milieu confiné (Essai de la boîte en L) :

Tout comme l'essai à l'anneau Japonais, cet essai permet de caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique.

La partie verticale du L (Figure-I.13) est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres Ø 14) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre deux barres).

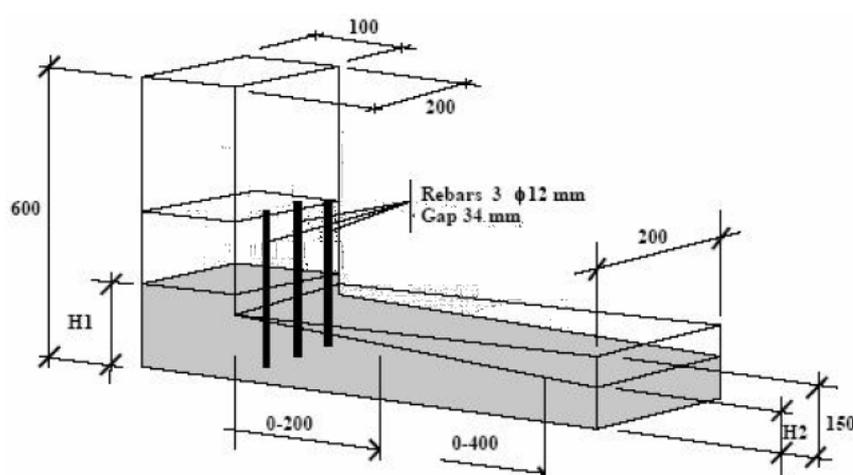


Figure I.13. Essai de la boîte en L [5].

Pour que le béton auto plaçant soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H/L max) doit être supérieur à 0,8. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton. [22]

I.9.3. Stabilité (Essai de stabilité au tamis)

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (Figure I.14).

Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto plaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier[10].

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P laitance) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton auto plaçant sont divisés en trois classes : [22]

- $0\% \leq \% \text{ P laitance} \leq 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < \% \text{ P laitance} \leq 30\%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ,
- $\% \text{ P laitance} > 30\%$: stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.



Figure I.14. Essai de stabilité au tamis

I.9.4. Essai de ressuage

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton,

les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables.[23]

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée. Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée.[23]

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié développé au LCPC (Figure-I.15). Le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloréthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [9]. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit.

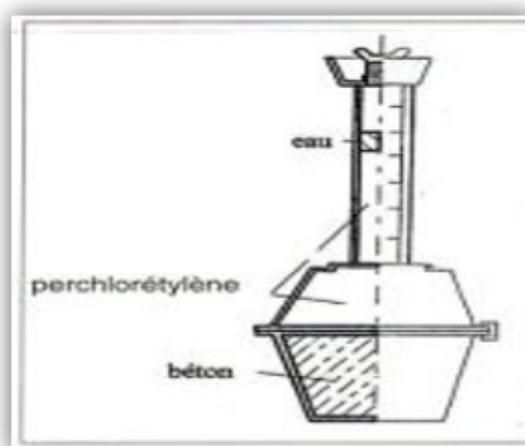


Figure I.15. Essai de ressuage [5].

I.10. Caractérisation des BAP à l'état durci

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

- Les essais de compression ;
- Les essais de traction par flexion ;

I.10.1. Les essais de compression :

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 10*10*10 cm conformément aux prescriptions de la norme .Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon (Figure-1.5). La contrainte de

compression à la rupture [Pa] est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée[24]

I.10.2. Les essais de traction par flexion

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (Figure-2.5). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 7x7x28 cm. La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante : $\sigma = Mf.a/2I$, avec le moment de flexion : $Mf = F.L/4$, où F est la charge de rupture, L la portée, I l'inertie de flexion, et a le côté du prisme. [24]

I.10.3 Les essais non destructifs

I.10.3.1. Définition de méthodes non destructives :

Elles représentent des méthodes de reconnaissances couramment appliquées aux ouvrages. Comme leur nom l'indique, il s'agit de mesures n'endommageant pas les éléments de structure. Ces essais ont la particularité d'être rapides et faciles à mettre en œuvre. [25]

Les Contrôles non destructifs sont un ensemble de méthodes qui permettent l'évaluation de l'état d'intégrité d'un matériau, de structures, ou d'ensembles mécaniques, sans les dégrader. Ils peuvent être appliqués pratiquement à tous les stades de vie d'un élément. [26] :

I.10.3.2 Avantages et inconvénients des essais non destructifs :

Les essais non destructifs nous apportent plusieurs bénéfices et satisfactions, d'un point de vu de rapidité d'où on peut obtenir des résultats dans quelques instants sur l'état de santé, des performances mécaniques ou des propriétés physiques d'une structure déjà existante. Un autre avantage réside dans le fait que ces méthodes nous permettent d'effectuer un nombre d'essais pratiquement infinis sur un même échantillon et de ce fait, économiser du matériau testé, ce qui rend ces méthodes plus économiques et moins couteuses à celles destructives.

Le désavantage essentiel de ces essais non destructifs est que les résultats obtenus ne sont pas à 100% fiables, car plusieurs facteurs influents ces derniers tel que la composition du béton et ces constituants, l'état de la surface testée, la façon de la mesure, la présence ou non des armatures, l'humidité et autres. [27].

I.10.4. Essai d'auscultation sonore : [EN 12504-4]

La mesure de la vitesse des ondes dans le béton est classiquement utilisée aussi bien en laboratoire que sur les ouvrages. Cette méthode est également normalisée par les normes Françaises (EN 12504-4) et américaines (ASTM-C597-02), et il existe des appareils commerciaux complets permettant de réaliser ce type de mesures. [26]

Le principe général est de mesurer la vitesse de l'onde mécanique se propageant dans le béton.

On utilise pour cela une paire de transducteurs, l'un servant de source et l'autre le récepteur. Cette méthode permet principalement de détecter :

- ❖ l'homogénéité et l'uniformité, ou le contraire, du béton de la structure ;
- ❖ Des grosses fissures ou des vides résultants par exemple de « nids de cailloux » et la détérioration due au feu, au gel ou à des agressions chimiques... [28]
- ❖ Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou les coefficients de Poisson des structures, à partir des relations. [28]
- ❖ la résistance du béton à très jeune âge ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de décoffrage

Cependant, la vitesse mesurée dépendant également de beaucoup d'autres paramètres du béton comme les hétérogénéités, la teneur en eau, les conditions de cure, la température, la présence de microfissures, etc., les valeurs obtenues peuvent être très différentes de celles obtenues par l'essai destructif de compression en laboratoire. [29]

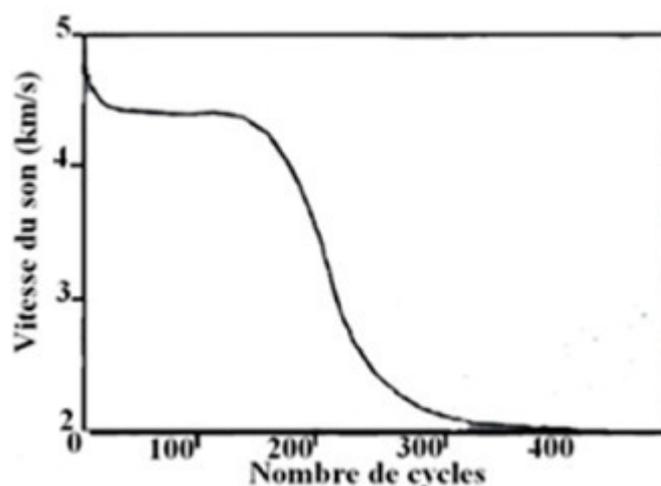


Figure I.16. Détérioration d'un béton par des cycles gel-dégel. [30]

Mais il reste à noter que ces essais ne sont toutefois 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 et du béton des éprouvettes utilisées pour l'étalonnage. [30]

I.10.5.Essai sclérométrique : [EN 12398]

Le scléromètre est un appareil relativement simple d'utilisation, il est destiné à mesurer, indirectement, la résistance à la compression du béton à partir de la mesure de sa dureté superficielle. Il existe une relation empirique de corrélation entre cette résistance et un indice dit " indice sclérométrique " et qui consiste à traduire la dureté du béton. [31]

a. Les avantages :

- ❖ C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide.
- ❖ Utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués.
- ❖ Une utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. (Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé). [30]

b. Les inconvénients :

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 et à des essais dans les conditions pour lesquelles les courbes d'étalonnage ont été établies.

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. Selon la norme BS 1881 : partie 202 : 1986, l'épaisseur concernée par cet essai est d'environ 30mm. Les changements qui n'affectent que la surface du béton, comme le degré de saturation en surface (qui abaisse l'indice de rebondissement) ou la carbonatation (qui augmente cet indice).

Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et de gros granulats et le degré de carbonatation de la surface. [30]

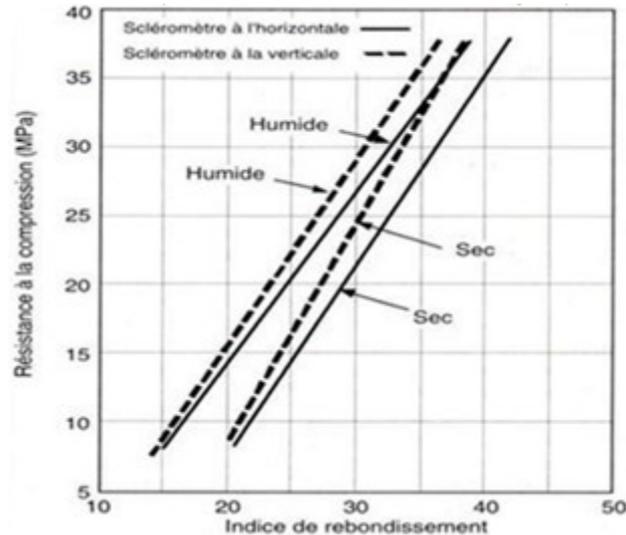


Figure I.17. La relation entre la résistance à la compression et l'indice de Rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides. [32].

I.11. Différentes approches de formulation d'un BAP

Il existe plusieurs approches empiriques pour formuler un BAP, parmi lesquelles on cite :

A. Méthode japonaise : [9]

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kōchi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût en genre sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

I.11.1. Dosage des gravillons:

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m^3 de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

I.11.2. Dosage du sable :

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

I.11.3. Dosage du liant :

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

I.11.4. Dosage de l'eau et du super plastifiant

Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

B. Méthode Suédoise

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al, 1995]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées. Les fines, l'eau et le superplastifiants sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat. [9]

C. Méthode Française (LCPC) :

Méthode française proposée par le (LCPC) où un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après : les distributions granulaires, les proportions du mélange, la compacité propre et la densité apparente

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple).
- le dosage, à saturation, du super plastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- le besoin en eau de ce mélange (en présence du super plastifiant) est déterminé.

- les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.10^4 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 auto plaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiants 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 auto plaçant sont atteintes. [9]

I.12. Fabrication, transport et mise en place des BAP :

I.12.1. Fabrication des BAP

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier.

L'intensité et le temps de malaxage ainsi que l'ordre d'introduction des constituants sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton, sur l'effet optimal des additions et des adjuvants, c'est la raison pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité du malaxeur [3]

I.12.2 Transport des BAP

En raison de sa fluidité élevée, le béton auto plaçant doit être transporté en camion malaxeur. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres : Le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier.

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire [3]

I.12.3. Mise en place des BAP :

Par rapport au béton vibré la mise en place du béton auto plaçant est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon trois méthodes différentes :

La première méthode est celle utilisée pour les bétons ordinaires vibrés, la mise en place se fait à l'aide d'une goulotte. Pour limiter le phénomène de ségrégation favorisé par ce procédé il convient de fixer la hauteur de chute maximale du béton à 5m.

La deuxième méthode consiste à utiliser un tube plongeur immergé dans le béton frais, dans la partie inférieure du coffrage.

La mise en place des BAP peut se faire par pompage, par cette troisième méthode il y a réduction du bullage et obtention de parements lisses.

Pour réussir les ouvrages en béton auto plaçant il est capital d'appliquer scrupuleusement les recommandations de fabrication, de transport et de mise en œuvre [3].

I.13. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de s'actualiser avec quelques études récentes concernant les bétons autoplaçants ainsi que leurs multiples propriétés, essentiellement, la fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation et la capacité de passage dans les milieux confinés et d'avoir une idée sur les principales méthodes de leur formulation conçues actuellement de manière empirique. A cet effet l' [AFGC], a émis des recommandations qui se limitent en trois essais :

Mesure d'étalement ; essai de la boîte en « L » ; et l'essai de stabilité au tamis.

Le facteur le plus important dans la formulation d'un BAP est l'eau en effet, le principe de ce type de béton est de diminuer la quantité d'eau utilisée par l'utilisation d'un superplastifiant tout en assurant une bonne maniabilité à l'état frais ,la diminution de la teneur en eau conduit à de bonnes caractéristiques mécaniques.

Chapitre II

APERÇU SUR LA RHEOLOGIE DES BAP

II.1. Introduction

Ce n'est que depuis peu de temps que les ingénieurs se familiarisent avec le mot rhéologie. Un grand nombre de travaux ont été effectués dans le passé sur la rhéologie des matériaux, tels que polymères, huiles multigrades, peintures, adhésifs, produits agroalimentaires, pharmaceutiques, cosmétiques, ou encore pâtes de ciment. Ceci résulte évidemment de la facilité d'étude autorisée par les petites tailles des particules de ces matériaux. Les diamètres des grains de ciment, par exemple, sont inférieurs à une centaine de microns. Cependant, la rhéologie des bétons est un domaine relativement vierge. Les difficultés viennent d'une part de la complexité de ces matériaux, constitués de plusieurs composants de nature différente : granulats, ciment, eau, air, éventuellement adjuvants et ajouts.

Dans ce chapitre, nous rappelons d'abord les théories et quelques notions de bases de la rhéologie. Nous discutons ensuite de quelques moyens existants d'étudier la rhéologie des bétons spécifiquement autoplacants.

II.2. Notions générales

II.2.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un béton a été définie comme étant "une caractéristique qui détermine la facilité d'un béton ou d'un mortier dont le malaxage, la mise en place et la vibration se sont déroulés dans des conditions aisées et homogènes". En condition de chantier, l'outil de caractérisation de l'ouvrabilité le plus courant dans le monde est le cône d'Abrams utilisé pour le test d'affaissement. [33]

II.2.2. Dilatance

La dilatance est l'augmentation du volume d'un fluide pendant le cisaillement. Des suspensions concentrées de particules, faisant glisser l'un devant l'autre conduisent à une telle expansion en volume. La dilatance ne doit pas être confondue avec l'épaississement de cisaillement sur le comportement [34].

II.2.3. Rhéologie

La rhéologie du béton frais est une science relativement jeune. En effet, les bétons relevant d'une telle approche, c'est-à-dire suffisamment fluides, sont d'emploi assez récent. D'autre part, on s'est contenté longtemps d'une approche technologique, consistant à soumettre un échantillon de béton à une sollicitation plus ou moins contrôlée, et à en tirer un indice (hauteur d'affaissement, temps d'écoulement, compacité, etc.) permettant de classer les mélanges en termes de maniabilité. Le fait que les classements obtenus avec différents essais ne coïncident pas entre eux montre les limites d'une telle approche. [35]

Tattersall a été l'un des pionniers de la rhéologie du béton frais, en proposant, au moyen d'un malaxeur instrumenté, une caractérisation plus complète de l'écoulement de ce matériau. Il a proposé de décrire le comportement du béton frais au moyen du modèle de Bingham, de la forme :

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Où

τ : la contrainte de cisaillement appliquée au matériau ;

τ_0 : le seuil de cisaillement (en Pa) ;

μ : la viscosité plastique (en Pa.s) ;

$\dot{\gamma}$: le gradient de vitesse (appelé aussi vitesse de cisaillement) [36];

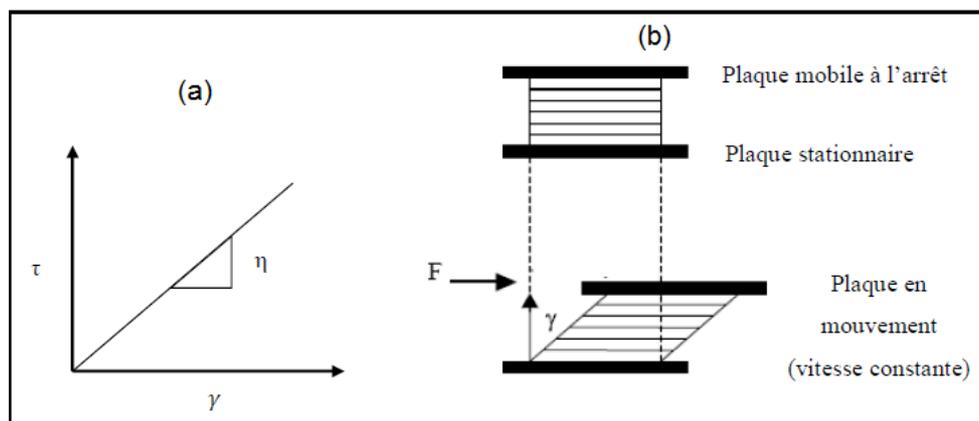


Figure 0.1. a) Schématisation du comportement rhéologique d'un corps newtonien.
 (b) Mouvement de cisaillement d'un système plaque-plaque [36]

II.2.4. Contrainte de cisaillement τ

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les « couches » sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'apparition de contraintes τ , qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche. [37]

Donc, on peut dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide avec :

$$\tau = \frac{dF}{dS}$$

Où :

dS : surface élémentaire d'une couche
cisillée.

DF : projection de la force de frottement
tangentielle.

II.2.5. Seuil de cisaillement τ_0

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour qu'un fluide, soumis à une déformation de cisaillement, s'écoule. En dessous de cette valeur, ce dernier se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes). Il existe différentes méthodes pour mesurer le seuil de cisaillement, qui mènent parfois à des notions physiquement différentes. [38]

Le seuil statique correspond à la contrainte à fournir afin d'obtenir le premier signe d'écoulement. En effet, la méthode de mesure est appliquée à une suspension vierge de toute sollicitation (à part le malaxage dans le cas de mélange), donc une suspension initialement structurée. Le seuil de cisaillement statique peut être déterminé en imposant une contrainte croissante jusqu'à la valeur provoquant l'écoulement de la suspension.

Par contre, le seuil de cisaillement dynamique (τ_0 dans l'équation du modèle de Herschel-Bulkley) correspond à une valeur théorique qui découle de l'extrapolation de la courbe d'écoulement à un gradient de vitesse de cisaillement nul. Il s'agit alors d'une valeur obtenue après la déstructuration du corps. La méthode de mesure consiste à déstructurer complètement la suspension testée en appliquant un gradient de vitesse suffisamment élevé, d'établir ensuite la courbe d'écoulement en faisant varier le gradient de vitesse, et de déduire la valeur de la contrainte à une valeur nulle du gradient de vitesse, à partir de l'équation du modèle. Par conséquent, la valeur du seuil de cisaillement statique est logiquement supérieure à celle du

seuil de cisaillement dynamique, en raison de l'état de déstructuration de la matière cisailée lors de l'écoulement.

II.2.6. Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles emprisonnées entre 2 plans parallèles de surface séparés d'une distance h . Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance dx à une vitesse constante de norme V_0 . [38]

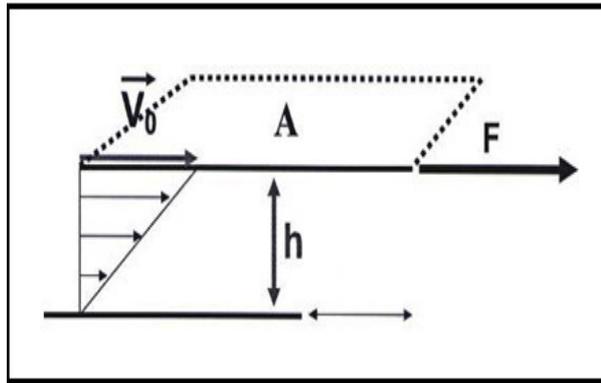


Figure II.2. Schéma de la vitesse de cisaillement.[38]

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse.

Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Ils se créent un gradient de vitesse entre les deux plans.

Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole γ suivant la relation :

$$\gamma = \frac{dx}{dz}$$

La norme du gradient de vitesse constant dans tout l'échantillon est définie comme la vitesse de cisaillement.

Appelée également vitesse de déformation ou taux de cisaillement, il s'agit de la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement. [37]

$$\dot{\gamma} = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dx} \right) = \frac{d}{dz} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz}$$

II.2.7. Viscosité

C'est une grandeur qui caractérise les frottements internes du fluide, autrement dit sa capacité à s'écouler. Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. C'est à dire, les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement. Elle peut être mesurée par un viscosimètre à chute de bille, dans lequel on mesure le temps écoulé pour la chute d'une bille dans le fluide. Elle peut également être mesurée par un récipient dont le fond comporte un orifice de taille standardisée. La vitesse à laquelle le fluide s'écoule par cet orifice permet de déterminer la viscosité du fluide.

La viscosité est déterminée par la capacité d'entraînement que possède une couche en mouvement sur les autres couches adjacentes. [34]

On distingue la viscosité dynamique et la viscosité cinématique.

II.2.7.1. Viscosité dynamique μ

On considère idéalement un liquide au repos comme un ensemble de couches moléculaires parallèles. Soumise à une contrainte tangentielle, une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente ; en raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement à cette dernière en même temps que la vitesse de déplacement de la première couche diminue. Cet effet de retard, Provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé la viscosité. [37]

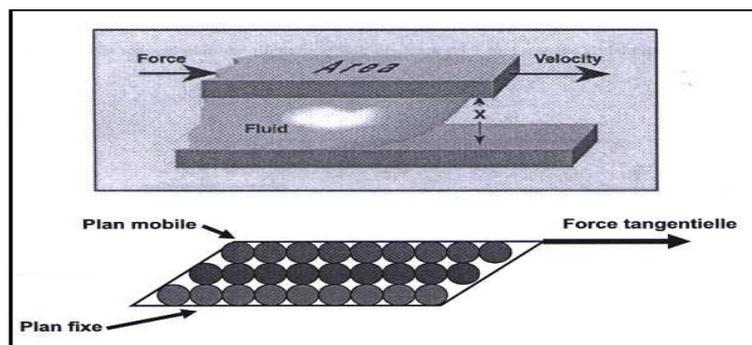


Figure II.3. Glissement des couches. [37]

La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle.

Le coefficient de viscosité est une grandeur physique qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Sa connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologie du matériau. On distingue différents types de viscosité (tangente,

apparente). Dans notre étude, nous exploiterons principalement la viscosité apparente. Ce paramètre est défini par la relation suivant :

II.2.7.2. Viscosité cinématique ϑ

C'est le rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique du fluide, ρ étant la densité du fluide, ϑ la viscosité cinématique. On définit la viscosité cinématique ϑ d'un fluide à partir de sa viscosité dynamique μ par la relation :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Elle correspond au temps qu'il faut à un fluide pour s'écouler dans un tube capillaire par la force de gravité. Son unité est le m^2/s , mais on utilise plus fréquemment l'ancienne unité, le stockes (cm^2/s) ou, en pratique, le centistokes (cSt), équivalent à $1 mm^2/s$. [37]

II.2.8. Fluide newtonien

Un fluide parfait (purement visqueux) est souvent représenté par une corrélation linéaire, qui est caractérisée essentiellement par une proportionnalité entre contrainte et vitesse de cisaillement.

Dans un écoulement newtonien, la contrainte varie linéairement en fonction de la vitesse de cisaillement. L'avantage du modèle est qu'il requiert uniquement la viscosité absolue μ . [39]

II.3. Notions générales sur le Comportement rhéologique des fluides

Cette partie est conçue pour aborder des différentes lois de comportement rhéologique, des modèles associés aux écoulements de suspensions, des problèmes structurations et déstructurations qui vont influencer sur le comportement rhéologique.

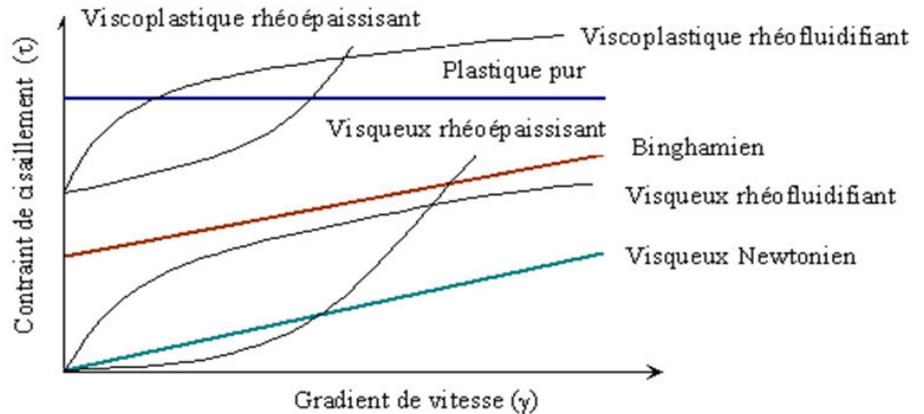
II.3.1. Lois de comportement rhéologique

D'un point de vue « rhéologique », chaque consistance, fonction de la composition, se traduit par un type de comportement associé à un : [40]

- Fluide visqueux : c'est à dire présentation d'un écoulement permanent sous son poids propre ;
- Fluide viscoplastique : c'est un fluide visqueux au-delà d'une certaine contrainte « seuil ». On distingue les fluides viscoplastiques rhéfluidifiants ou rhé épaisissants ;

- Fluide plastique : c'est à dire en écoulement permanent lorsqu'un certain état de contrainte (seuil) est atteint. On distingue des écoulements plastiques dilatants et contractants.

Figure II.4 Les types de comportement rhéologique.
[37]



Dans tous les cas, le type de comportement est illustré par une allure de courbe d'écoulement appelée Rhéogramme, $\tau(\dot{\gamma})$, dont les paramètres sont caractéristiques du fluide analysé. Dans le cas d'un fluide viscoplastique de Bingham, par exemple, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique sont respectivement l'ordonnée à l'origine et la pente de la courbe $\tau(\dot{\gamma})$. Ces paramètres sont identifiables à l'aide de rhéomètres spécifiques.

II.3.2. Fluides visqueux

L'écoulement des suspensions concentrées est parfois comparé à celui des fluides non newtoniens incompressibles, La loi de comportement de ces fluides écrit comme suite : [40]

$$\sigma_{ij}^d = \eta \sqrt{I_2}^{(N-1)} D_{ij}$$

Avec :

σ_{ij}^d : le tenseur déviateur des contraintes :

$$\sigma_{ij}^d = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} tr(\sigma)$$

I_2 : le deuxième invariant du tenseur des

vitesse de déformation : $I_2 = \frac{1}{2} D_{ij} D_{ij}$

D_{ij} : le tenseur des vitesses de déformation.

Dans le cas de la pâte de ciment, on a $0 < N < 1$.

En présence de matériaux rhéofluidifiants, tels que les pâtes de ciment et les mortiers (de texture fluide), $0 < N < 1$.

Dans le cas de matériaux rhéoépaississants, tels que les boues argileuses, $N > 1$.

Ce comportement se distingue ainsi du comportement visqueux newtonien incompressible ($N=1$), pour lequel la contrainte de cisaillement est une fonction linéaire du taux de déformation,

$$\sigma_{ij} = \eta D_{ij}$$

Il y a plusieurs types des modèles de comportement rhéologique pour des fluides exclusivement visqueux on cite

- **Modèle de Williamson**

Ce modèle s'écrit :

$$\tau = \frac{\tau_{\infty} \dot{\gamma}}{\dot{\gamma} + a} + \mu_{\infty} \dot{\gamma}$$

Où :

τ_{∞} , μ_{∞} et a sont trois constantes du modèle. Quand $\tau_{\infty} = 0$, le modèle revient à celui de Newtonien.

- **Modèle de Sisko**

Ce modèle s'écrit :

$$\tau = a\dot{\gamma} + b(\dot{\gamma})^c$$

Où :

a , b et c sont trois constantes du modèle. Quand $c = 1$, le modèle revient au modèle de Newtonien. En variant la constante c , on tente d'exprimer les fluides rhéoépaississants et rhéofluidifiants.

- **Modèle de Briant**

Ce modèle s'écrit :

$$\tau = \mu_{\infty} \dot{\gamma} \left(1 + \frac{\tau_{\infty}}{a\mu_{\infty} \dot{\gamma}} \right) a$$

Où :

τ_{∞} , μ_{∞} et a sont trois constantes du modèle.

- **Modèle de Powell-Eyrin**

Ce modèle s'écrit :

$$\tau = \mu_{\infty} \dot{\gamma} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \frac{\sin(\beta \dot{\gamma})}{\beta}$$

Où :

μ_0 , μ_{∞} sont respectivement la viscosité initial et finale du matériau, et β une autre constante du modèle.

II.3.3. Fluides viscoplastiques

En présence de suspensions très concentrée, matériaux qu'on peut qualifier de pseudo-solides, l'écoulement ne se produit que lorsqu'un seuil de contrainte est dépassé. Au-delà de cette contrainte seuil, les matériaux se comportent comme des fluides visqueux

(incompressibles, non Newtoniens). C'est le cas des mortiers et bétons fermes et des pâtes céramiques de faible teneur en eau. De tels matériaux sont appelés "fluides viscoplastiques à seuil". [41]

Doustens et Laquerbe [42] ont considéré que les pâtes souples de kaolin possédaient un comportement assimilable à celui des fluides de Bingham. L'équation régissant l'écoulement dans ce cas s'écrit sous la forme :

$$\sigma_{ij}^d = \left(2\mu + \frac{K}{\sqrt{I_2}} \right) \cdot D_{ij}$$

Un tel comportement est également exploité par Coussot pour caractériser des boues naturelles.

D'autres suspensions se comportent comme une combinaison d'un fluide plastique à seuil et d'un fluide d'Ostwald de Waale, ce sont des fluides d'Herschel-Bulkley, dont la loi d'écoulement prend la forme suivant

$$\sigma_{ij}^d = \eta \sqrt{I_2}^{(N-1)} D_{ij} + \left(\frac{K}{\sqrt{I_2}} \right) \cdot D_{ij}$$

Ce type de comportement est exploité pour caractériser le comportement des bétons par Larrard et coll, ainsi que par Cyr [43] pour décrire le comportement des pâtes de ciment adjuvantes et Mansoutre [44] pour les pâtes de silicate tricalciques. Notant que certains auteurs qualifient les pâtes de ciments comme des fluides de Bingham dont le comportement évolue vers celui d'un liquide newtonien en présence d'une vibration [45] [46] Ou de super plastifiants.

Les modèles ci-après sont destinés a priori aux fluides viscoplastiques. Nous y trouvons donc toujours une constante τ_0 pour exprimer le seuil de cisaillement. Remarquons que ces modèles s'adaptent également aux fluides exclusivement visqueux en prenant τ_0 nul.

- **Modèle de Herschel Bulkley**

Ce modèle s'exprime par :

$$\tau = \tau_0 + b(\dot{\gamma})^c$$

Où :

τ_0 est le seuil de cisaillement, b et c deux constantes du modèle (paramètres caractéristiques de l'écoulement rhéologique)

Nous voyons que quand $c = 1$ et $\tau_0 \neq 0$, nous retrouvons le cas Binghamien. Quand $c = 1$ et $\tau_0 = 0$, nous retrouvons le cas Newtonien. En variant la constante c et le seuil de cisaillement τ_0 , on peut tenter d'exprimer les fluides rhéoépaississants et rhéofluidifiants. [41]

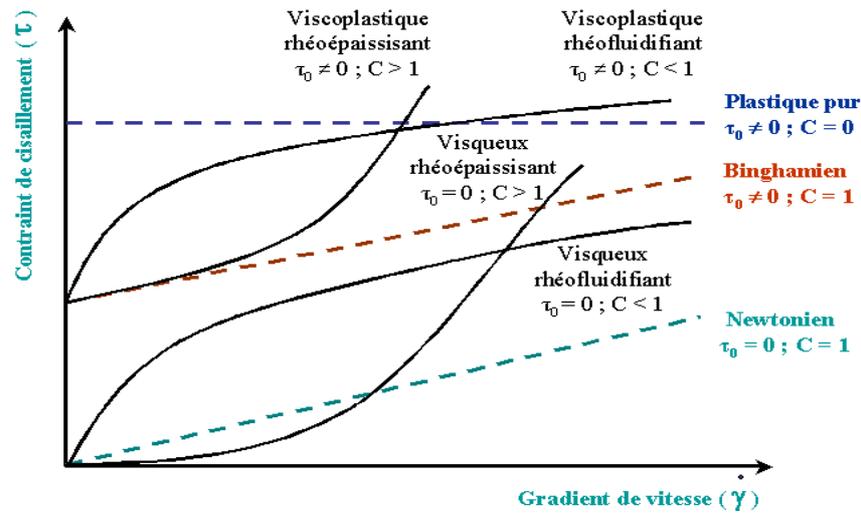


Figure 0.2. Modèle Herschel-Bulkley en variant c et τ_0 [41]

- **Modèle de Casson**

Ce modèle s'exprime par : [41]

$$\sqrt{(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0})^2} = a(\dot{\gamma})$$

Où :

τ_0 est le seuil de cisaillement, a est une autre constantes du modèle.

- **Modèle de Vom-Berg**

Ce modèle s'exprime par : [41]

$$\tau = \tau_0 + a \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{b} \right)$$

Où :

a et b étant deux constantes du modèle.

Modèle de Robertson-Stiff

Ce modèle s'exprime par [41].

$$\tau = a(b + \dot{\gamma})^c$$

Où:

a , b et c étant trois constantes du modèle. Dans ce modèle, le seuil de cisaillement $\tau_0 = a \cdot b^c$

I.3.4. Fluides plastiques parfait

Sur le plan analytique, la plasticité d'un matériau se transcrit à l'aide d'une fonction de charge $f(\sigma_{ij})$ telle que :

- Lorsque $f(\sigma_{ij}) < 0$, l'écoulement ne se produit pas.
- Au moment où le seuil est atteint, $f(\sigma_{ij}) = 0$, l'écoulement apparaît. Si aucune augmentation des contraintes n'apparaît pendant l'écoulement, le matériau est dit « parfaitement plastique ». Par ailleurs, si des déformations évoluent pendant l'écoulement, le matériau est qualifié de "viscoplastique".

Dans la littérature, deux critères principaux sont énoncés :

- **Critère de Von Mises**

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = K^2$$

Ou encore :

$$\sqrt{J_2} = K$$

Où :

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ sont les contraintes principales du tenseur de contrainte σ .
 J_2 est le deuxième invariant du tenseur déviateur de contrainte.

- **Critère de Tresca**

$$\text{Max} | \sigma_i - \sigma_j | = 2K$$

De tels critères sont souvent associés aux comportements de pâtes minérales, de sols. D'autres critères associant un écrouissage peuvent être utilisés (Drucker-Prager, Coulomb, ...) en particulier lorsque l'écoulement du matériau s'accompagne d'un drainage.

II.3.5. La thixotropie et anti thixotropie

II.3.5.1. La Thixotropie

Certaines suspensions peuvent présenter un écoulement dont les caractéristiques dépendent du temps ou des traitements antérieurs (fluides à mémoire). C'est le cas des corps thixotropes caractérisés par une diminution réversible de la viscosité apparente lors d'une sollicitation à vitesse constante. Cette propriété est généralement caractéristique des suspensions floculées. Elle est liée à la destruction progressive des floccs sous cisaillement. Les Rhéogrammes de telles suspensions présentent une boucle d'hystérésis, c'est à dire que la courbe de montée en cisaillement ne coïncide pas avec la courbe de descente.[41]

II.3.5.2. L'Anti thixotropie

Il s'agit d'un épaissement de la préparation en fonction de la durée de cisaillement. Le gel d'hydroxyde de magnésium USP présenterait un tel comportement.

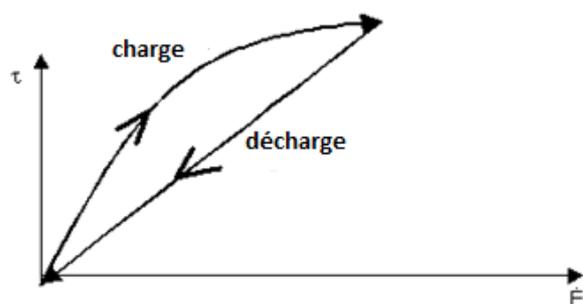


Figure II.3 le corps thixotropique [41]

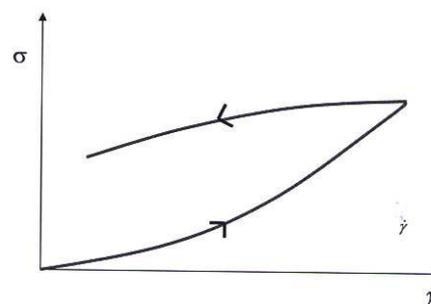


Figure II.4 Système présentant une anti thixotropie [41]

II.3.6. Comportement rhéologique du béton frais

L'étude rhéologique appliquée aux bétons frais est l'un des aspects scientifiques des bétons le plus étroitement lié au domaine pratique. Les difficultés liées au malaxage, à l'écoulement dans les coffrages, au maintien de la stabilité rhéologique, à la capacité à se consolider ainsi que la réalisation d'une finition de surface adéquate ne sont que quelques exemples de problématiques pouvant être rencontrées avec l'utilisation d'un béton ne possédant pas un comportement rhéologique adéquat. Dans cette optique, la composition d'un mélange de béton frais doit se faire selon les règles de l'art, tant en qualité qu'en proportion de ciment, d'agréats [42]. Chacune des composantes de la formulation d'un mélange de béton joue un rôle essentiel dans le comportement rhéologique. Il est donc primordial d'effectuer une analyse individuelle et d'ensemble afin de bien saisir l'importance de chacune de ces composantes [43].

II.3.6.1. Rhéomètres à bétons

Des le début de ce nouveau siècle, les chercheurs se sont orientés vers une nouvelle réflexion, celle de développer des rhéomètres moins couteux et portables afin d'être plus pratiques même au niveau des chantiers.

A ce titre, le rhéomètre ICAR a été développé [44], un appareil type agitateur-malaxeur portable avec une géométrie vanne, composé d'un agitateur, d'un récipient et d'une pale en acier à 4 faces, qui doit être placée au centre du béton (C.à.d. doit être place a niveau de 13 cm par rapport au fond du récipient et doit être entièrement couverte de 13 cm de béton). Les dimensions du récipient et de la pale varient en fonction du diamètre maximal des granulats.

Adapté pour des bétons ayant des affaissements supérieurs à 50 mm jusqu'à des bétons autoplaçants, ce rhéomètre est plus efficace pour les bétons incorporant de grandes quantités

de fines et pour les bétons thixotropes car la méthode d'essai ajoute de l'énergie au béton et fournit, en conséquence, une mesure dynamique.

II.4. Rhéologie des bétons autoplaçants (BAP)

Les BAP sont une nouvelle génération de bétons très déformables qui se mettent en place sans vibration sous le seul effet de la gravité, même dans des coffrages très ferrailés. Leur avènement a favorisé le développement de l'application de la rhéologie dans le domaine des matériaux cimentaires. Ces bétons doivent résister à la ségrégation «dynamique» (en phase de coulage) et à la ségrégation « statique » (une fois en place) afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement.

II.5. Caractérisation du comportement rhéologique des BAP

Plusieurs essais permettent de caractériser les propriétés à l'état frais du béton : essais d'étalement (ASTM C611), le J-Ring (ASTM 1621), essai d'entonnoir en V (V-Funnel), le temps d'écoulement T50. Ces méthodes empiriques ne donnent qu'une indication quantitative de la viscosité plastique lorsque le seuil tend vers zéro.

Plusieurs modèles mathématiques complexes [45] ont été proposées pour prédire le seuil de cisaillement et la viscosité plastique en faisant l'hypothèse que le béton est un fluide de Bingham. Bien que l'estimation des propriétés rhéologiques du béton soit encore difficile, [45] ont proposé la détermination des propriétés rhéologiques en fonction des essais empiriques que sont l'étalement, et la densité du béton frais.

$$\tau = \frac{4gV}{\sqrt{3}\mu} \frac{\rho}{S_f^2} \quad \text{Avec } g \text{ et } V \text{ respectivement la pesanteur et le volume du cône}$$

d'Abrams.

$$\mu = \frac{\rho g H V}{150 \pi S t_s^2} t_s \quad \text{Avec } t_s \text{ le temps nécessaire pour que le béton s'étale.}$$

Toutefois, si le rapport entre la viscosité plastique et le seuil de cisaillement (μ/τ_0) est supérieure à 10, les méthodes d'essai empiriques comme l'essai d'affaissement ou d'étalement peuvent devenir insuffisantes pour décrire la maniabilité globale des bétons [46]. Dans ce cas, seule la caractérisation par rhéomètre permet la détermination des caractéristiques rhéologiques des BAP.

Le rhéomètre de type couette est le plus approprié pour la détermination des paramètres rhéologiques des matériaux cimentaires.

II.5.1. Influence des paramètres de formulation

Les effets de l'air, de l'eau, de calcaire et des superplastifiants (SP) sur les propriétés rhéologiques du béton et du mortier ont été étudiés avec un rhéomètre de type Couette [47].

- **Eau et air**

L'augmentation du volume d'air occlus diminue la viscosité plastique des bétons alors que l'augmentation du dosage en eau diminue la viscosité plastique et le seuil de cisaillement. Les pâtes de ciment peuvent avoir un comportement différent à cause de la thixotropie beaucoup plus prononcée [46].

- **Superplastifiants (SP)**

L'ajout de superplastifiants (SP) diminue le seuil de cisaillement mais n'a pas d'effet sur la viscosité plastique des bétons, alors qu'il pourrait réduire la viscosité plastique de la pâte de ciment. La fluidification des BAP se fait par l'adsorption des superplastifiants à la surface des particules créant ainsi la défloculation et la dispersion des grains de ciment par répulsion stérique ou par répulsion électrostatique (Figure II.8).

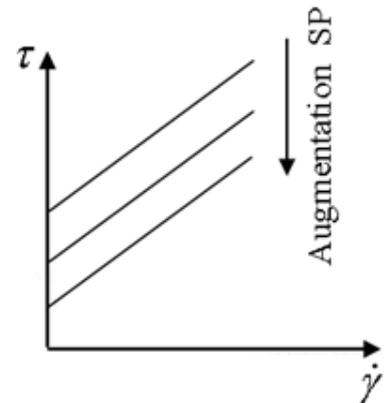


Figure II.8. Rhéogramme illustrant l'influence de SP sur les propriétés rhéologiques des bétons [46]

- **Granulats**

Les granulats influencent également les propriétés rhéologiques. Les études ont montré que la viscosité plastique minimale des bétons est obtenue pour des compacités granulaires élevées (sable + gros granulats) [50]. Les bétons de granulométrie continue améliorent la stabilité statique et la granulométrie discontinue confère une faible viscosité pour un même type de gros granulats. Les granulats roulés quant à eux donnent des bétons de faible viscosité et de faible seuil de cisaillement par rapport aux granulats concassés à cause de la réduction des frottements intergranulaires et de la compacité granulaire élevée des granulats roulés. L'augmentation des particules plates et allongées accroît le seuil de cisaillement, mais n'a pas d'effets significatifs sur la stabilité statique des BAP.

Une approche qualitative synthétique entre paramètres de formulation et propriétés rhéologiques souhaitées est donnée sur la Figure II.9 [48].

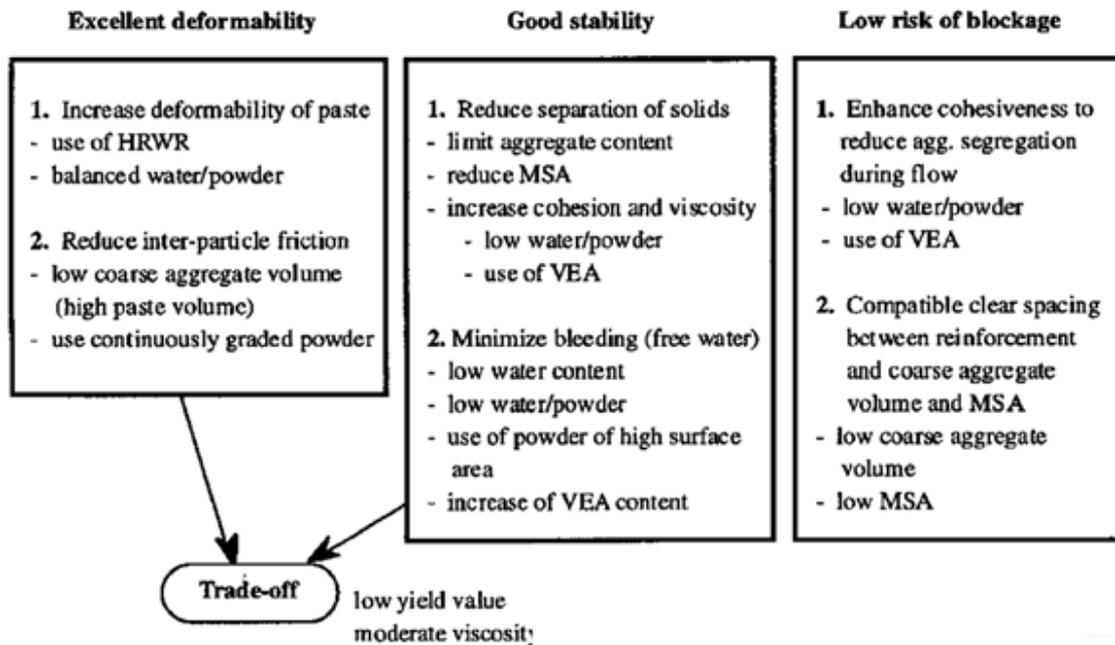


Figure II.9. Propriétés d'ouvrabilité nécessaire pour une bonne mise en place [48].

• fillers calcaires :

Les fillers calcaires sont des fines minérales obtenues par broyage d'une roche calcaire. Ils sont généralement utilisés comme additions inertes substitués ou ajoutés au ciment pour augmenter le volume de poudre surtout dans les BAP.

L'effet filler vient du fait que cette addition, une fois finement broyée, puisse combler les vides entre les particules de dimensions plus importantes et améliore ainsi la compacité du squelette granulaire et les propriétés du béton à l'état frais ainsi qu'à l'état durci [49].

Bien qu'ils soient généralement inertes, les fillers calcaires peuvent participer, dans certains cas, aux réactions d'hydratation liées à la phase de l'aluminate par la formation du monocarbo-aluminate [50]. La présence de filler calcaire entraîne aussi une accélération de la réaction d'hydratation du ciment, qui est due à un effet de nucléation hétérogène ou la germination des phases hydratées se produit plus aisément au contact de grains de calcaire, ce qui entraîne une précipitation plus rapide des C-S-H et de la portlandite [51]. Toutefois, une grande partie de l'eau restera presque entièrement disponible pour la réaction du ciment [49]. Plusieurs études ont traité l'effet de l'incorporation des fillers calcaires dans les bétons autoplacants d'où on remarque que la substitution du ciment par des fillers calcaires contribue à diminuer l'étalement des BAP et augmente leurs temps d'écoulement au V- Funnel. Cet effet est accentué au-delà de 20% de substitution [52].

D'autres ont traité l'influence des fillers de densité égale à 2.65, présentant une Surface spécifique de 5650 g/cm² et constitués de 97,2% de particules de diamètre inférieur à 45 μm. Ces additions contribuent à diminuer le seuil de cisaillement et de la viscosité plastique et améliorent la stabilité des BAP lorsqu'elles sont présentées dans le mélange à des taux supérieurs à 100 kg/m³. Par ailleurs, l'augmentation du dosage en fillers calcaires permet de réduire la demande en superplastifiant pour une ouvrabilité donnée, surtout avec les polycarboxylates. Par contre, la perte de fluidité après 45 minutes dépend du dosage en ciment (figure II.10) [53,54].

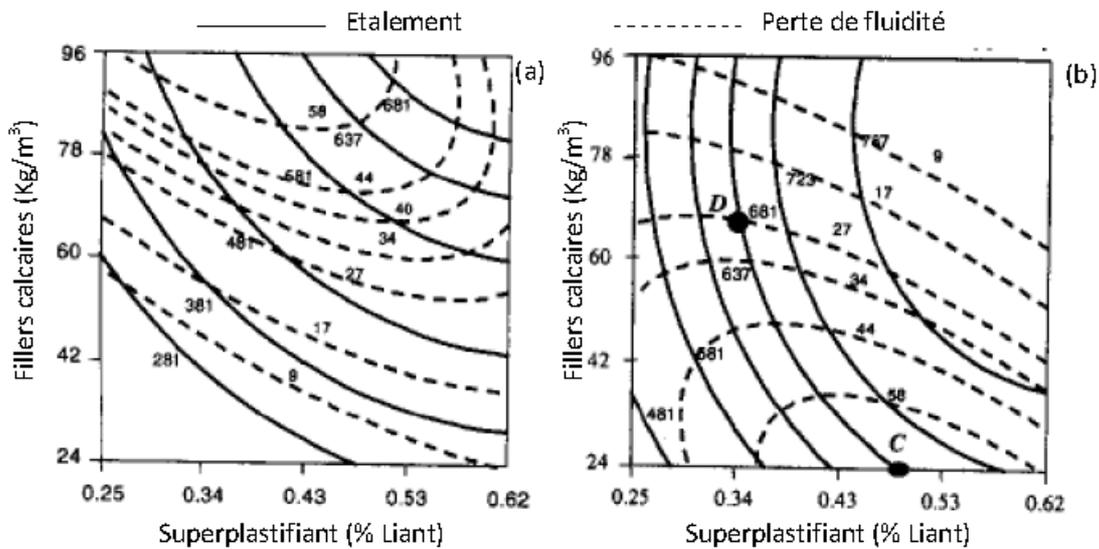


Figure II.10 : Diagramme de contours de l'étalement à T0 et de la perte de fluidité à T45 pour Des mélanges avec fillers calcaires et superplastifiants ($E/L = 0,55$) (a) Ciment = 290 Kg/m³ ; (b) Ciment = 360 Kg/m³ [53].

Récemment, une étude a recommandé d'utiliser des taux de fillers calcaires variant entre 150 et 225 Kg/m³ pour atteindre des propriétés rhéologiques caractéristiques des BAP avec des viscosités plastiques élevées et des seuils de cisaillement réduits. Par ailleurs, une combinaison des fillers calcaires avec de la fumée de silice peut faire croître considérablement le seuil de cisaillement mais réduit, par contre, la viscosité plastique en raison d'un meilleur arrangement des grains du liant [55].

Toutefois, le dosage en filler doit être optimisé d'une façon minutieuse, car l'utilisation de ces additions peut significativement influencer la thixotropie du mélange [56].

Comme pour le ciment, l'influence de la surface spécifique Blaine (SSB) des fillers calcaires, a un effet non négligeable sur la rhéologie des BAP. En effet, des recherches ont constaté que la viscosité et le seuil de cisaillement des BAP diminuent en augmentant la

finesse des additions calcaires. Aussi, la cinétique de diminution de l'étalement est plus prononcée pour les BAP formules avec des fillers ayant une faible surface Blaine [57].

A l'échelle du béton, pour un dosage en eau constant, on a observé une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité avec l'augmentation de la surface spécifique du filler mesurée par la technique BET [58].

Sur le plan chimique, une étude a spécifié que des variations faibles du dosage en MgO du filler (compris entre 1,75 et 2,86%) peuvent créer des interactions avec certains superplastifiants et causer un accroissement de la viscosité de la pâte de filler [59].

Les impuretés telles que les argiles ou les graphites présentées dans les fillers réduisent la capacité d'écoulement en raison d'une demande en eau accrue ou encore à cause des interactions avec les adjuvants chimiques [60, 61].

Concernant le dosage optimum des fillers qui satisfait les exigences du BAP, des recherches trouvent qu'il dépend de la finesse des fillers ; mais également de la roche mère. Il a conclu que l'étalement et le temps d'écoulement sont inversement proportionnels à la surface spécifique des additions utilisées (figure II.9). Ce résultat est du au taux d'absorption qui est proportionnel à la progression de la SSB (figure II.10). Par ailleurs quand la poudre de marbre est employée, la fluidité est légèrement réduite [62].

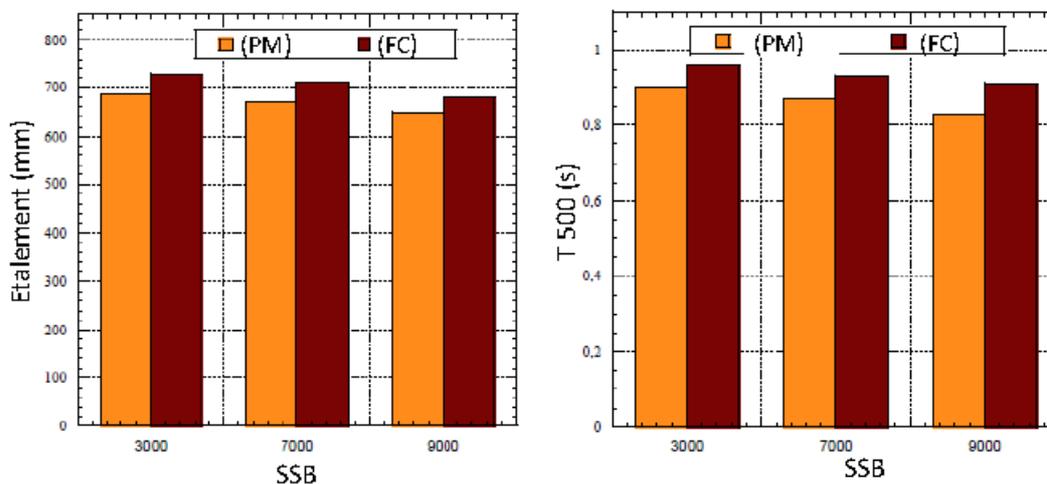


Figure II.11 : Influence des additions et de leurs SSB sur l'étalement et T500 [63]

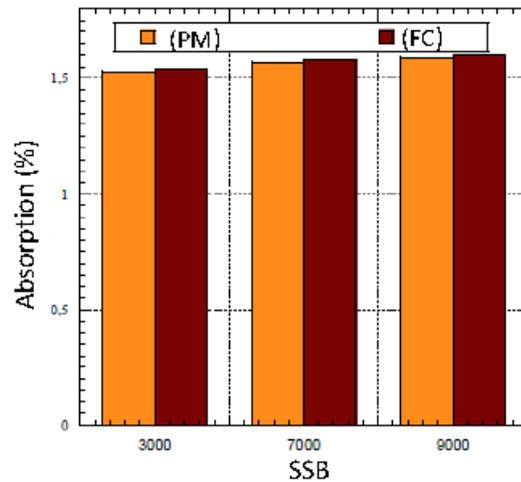


Figure II.12: Variation de l'absorption en fonction de la SSB [63].

D'autres chercheurs ont comparé l'influence de trois types de roches : les fillers calcaires, la poudre de Basalte et la poudre de marbre, sur le comportement des BAP à l'état frais (figure II.13). Les auteurs recommandent un taux de substitution de 20% de ciment par ces additions pour avoir les meilleures performances à l'état frais. Ils ont aussi montré l'effet bénéfique des fillers calcaires par rapport aux autres poudres [64].

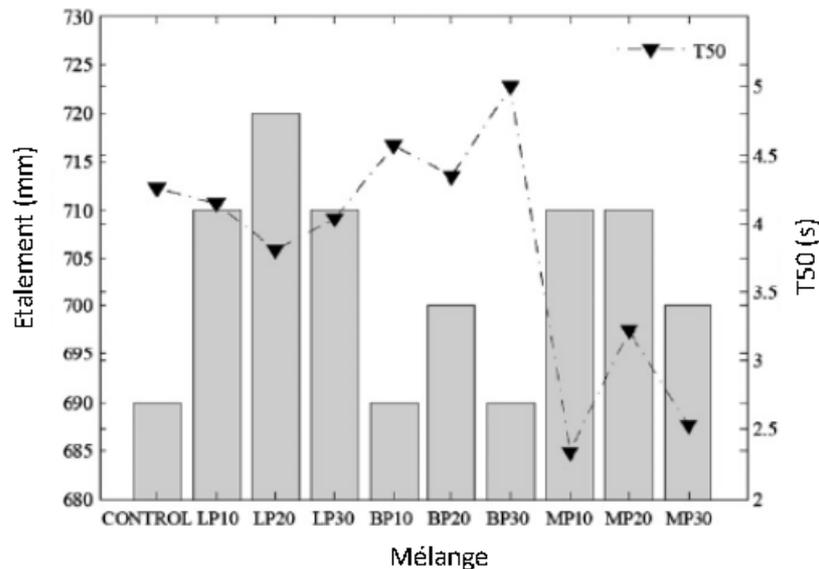


Figure II.13: Etallement et T500 des BAP avec fillers calcaires (LP), poudres de basalte (BP) et poudres de marbre (MP) [64]

II.5.2. Relation entre rhéologie et ouvrabilité

Le béton doit être en mesure de bien circuler dans tous les coins du coffrage pour le remplir complètement, avec ou sans apport d'énergie externe. Ce processus peut être entravé par la présence d'armatures confinées. Cet obstacle se traduit par une perte de niveau du béton

en observant son profil longitudinal au moment de l'arrêt. Cette perte de niveau est fonction du seuil de cisaillement et des caractéristiques du ferrailage.

Des chercheurs ont recommandé, pour des bétons autoplacants destinés à une application structurale, un étalement compris entre 650 et 750 mm afin d'assurer une bonne capacité de remplissage (80% et plus). Pour une bonne maniabilité, les BAP doivent remplir des spécifications particulières relatives aux essais de J-Ring, de tassement et de la boîte en L [64].

D'autres études ont tenté de relier la maniabilité des BAP aux paramètres rhéologiques le seuil de cisaillement et la viscosité plastique (Figure II.14). Selon ces études[46], si la viscosité plastique de Bingham μ est faible, c'est-à-dire en dessous de 40 Pa.s, le BAP doit avoir un seuil de cisaillement élevé, pour avoir une bonne stabilité. D'autre part, si le BAP est très visqueux avec une viscosité plastique supérieure à 80 Pa.s, le seuil de cisaillement doit être faible, par exemple en-dessous de 15 Pa afin de maintenir une fluidité adéquate. Pour des viscosités supérieures à 100 Pa.s, le seuil de cisaillement doit être proche de zéro pour avoir une fluidité suffisante. τ_0

Au Japon, les BAP présentent généralement une viscosité plastique très élevée en raison de la grande quantité de poudre utilisée dans le mélange de béton à cause de la forte densité des armatures. Le seuil de cisaillement dans ce cas, est en général négligeable ou proche de zéro [46]. En Norvège, en Islande et en Suisse (où, souvent, de très bons agrégats sont disponibles pour la formulation), les BAP ont des viscosités plastiques faibles et des seuils relativement élevés (entre 20 et 40 Pa). En Amérique du Nord, les seuils des BAP sont faibles et les viscosités modérées. L'Association Française de Génie Civil spécifie trois classes d'étalements pour les bétons autoplacants. La première classe ne présente pas de risque de ségrégation visible et pour les deux autres, elle recommande l'utilisation d'agent de viscosité au besoin pour réduire le ressuage et le risque de ségrégation lorsqu'une quantité suffisante de fines n'est pas utilisée.

Tous les éléments développés précédemment montrent clairement que le choix d'un domaine de maniabilité est la clef d'une mise en place efficace. La présence d'armatures joue un rôle important sur ce choix. Un mauvais choix peut compromettre les propriétés du béton durci et sa durabilité. Par exemple, l'augmentation locale du seuil de cisaillement entraîne une réduction de la maniabilité et peut entraîner un défaut de mise en place ou le maintien de l'air occlus dans le béton (présence de nids d'abeille à la surface des BAP).

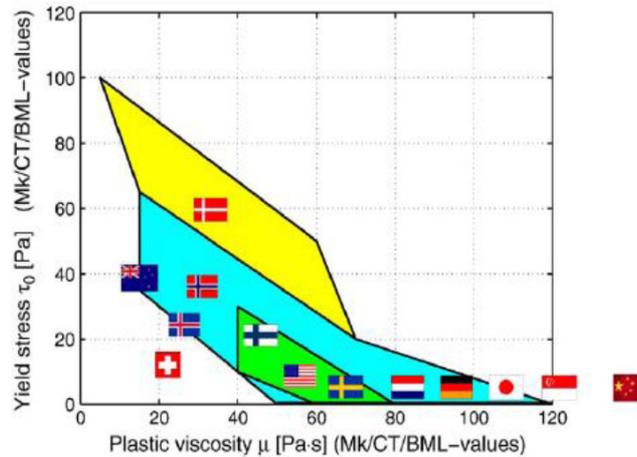


Figure II.14 : Vision globale de domaines de maniabilité selon plusieurs pays [46]

II.5.3. Relation entre rhéologie et durabilité

Dans le paragraphe précédent, nous avons présenté un état de la littérature sur la relation qui existe entre la rhéologie et la maniabilité des BAP. En revanche la littérature est quasi absente sur les relations possibles entre la rhéologie ou l'ouvrabilité du béton et ses propriétés à l'état durci, notamment les propriétés mécaniques et de durabilité. Nous savons toutefois que dans le cas des bétons conventionnels vibrés, les paramètres de vibration jouent un rôle très important sur la qualité du parement (texture, bullage) ainsi que sur les propriétés mécaniques et physiques (perméabilité et porosité) dans la mesure où la vibrations détermine le degré de consolidation du béton.

Une mauvaise consolidation peut entraîner une non-homogénéité des bétons, favoriser la présence des défauts locaux entraînant la formation de porosité et éventuellement des nids d'abeilles. Ces imperfections peuvent être encore plus préjudiciables si elles se produisent dans les couches de surface des bétons de structure. La mauvaise consolidation peut conduire à des dommages se produisant par les mécanismes de gel, ou par la corrosion des armatures et autres attaques chimiques, principalement par transport dans le béton des matières agressives telles que l'eau, des chlorures, du dioxyde de carbone et de l'oxygène. Une couche de surface bien consolidée du béton est donc particulièrement importante pour la qualité et la durée de vie de la structure béton.

Il faut, cependant, veiller à ne pas sur-consolider le béton au risque de provoquer de la ségrégation et d'expulser tout l'air entrainé (nécessaire pour la résistance des bétons aux cycles gel-dégel). De ce fait l'avènement des des BAP ont permis en partie de réduire l'énergie de consolidation ou de l'éliminer.

L'étude a également montré que la résistance en compression varie en fonction de l'énergie de consolidation.

Dans le cas des BAP, à cause de leur formulation particulière et de leur fluidité (faible seuil de cisaillement), la consolidation est faite sans apport d'énergie et l'air occlus est éliminé par l'effet des forces d'Archimède. Cette auto consolidation est faite grâce aux paramètres rhéologiques des BAP. En conséquence, les paramètres rhéologiques des BAP devraient jouer un rôle équivalent sur leur durabilité.

II.6 .Conclusion

Dans ce chapitre, les principaux modèles rhéologiques adaptés aux bétons ont été défini. Et montre que le modèle de Bingham peut être utilisé pour d'écrire le comportement des BAP. Toutefois, les modèles non linéaires, spécialement celui d'Herschel-Bulkley ou de Bingham modifié serait mieux adaptes a cette nouvelle famille des bétons. Par contre, l'évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement (rhéo-fluidifiant ou rhéo-épaississant), pour les modèles non linéaires, peut dépendre de certains paramètres intrinsèques ou extrinsèques au mélange.

CHAPITRE III

PROGRAMME EXPERIMENTAL

III.1 Introduction :

La formulation d'un BAP requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, et l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

L'étape de formulation consiste à choisir une proportion optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques du béton.

Nous présentons dans ce chapitre les différentes qualités et caractéristiques des matériaux utilisés, pour la confection et la formulation du béton autoplaçant, les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de Bordj Bou Arreridj.

III.1 Les matériaux utilisés :

- Le sable à l'origine siliceux provenant de Oued souf.
- Deux fractions de gravier concassé (3/8,8/16) l'origine carrière<< Mechri BBA>>
- Ciment cpj42.5 provenant de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalaa «M'sila»
- L'adjuvant MEDAFLOW 30 (super plastifiant) provenant de Granitex D'Alger..
- Les additions minérales : le filler Calcaire (SSB 8000 cm²/g) provenant de la carrière de Constantine et la poudre céramique blanche (SSB 6000 cm²/g) acquis à partir du broyage de leurs déchets dans la cimenterie **d'Ain EL-kebira Sétif**.
- L'eau de gâchage et conservation : eau potable fournie.

III.2 Caractéristiques du sable utilisé :

III.2.1 Essai d'analyse granulométrique : [NF EN P18-650]

L'analyse granulométrique est une opération qui nous permet d'identifier un matériau, les masses des différents refus ou celles des différents tamis sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

L'analyse granulométrique permet aussi, de déterminer la grosseur minimale «d » et la grosseur maximale «D» des matériaux entrant dans la composition du béton, pour pouvoir les combiner dans les meilleures conditions.

L'allure de la courbe granulométrique, permet de faire apparaître certaines propriétés des matériaux utilisés pour l'analyse qui nous permet de calculer aussi le module de finesse du

matériau et en particulier celui du sable, qui est un facteur important dans une étude de composition de béton.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 Analyse granulométrique de sable

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
3,15	0	0	0	100
2,5	4	4	0.4	99.6
1,25	50	54	5.4	94.6
0,63	205.5	259.5	25.95	74.05
0,315	432.5	692	69.20	30.8
0,16	237.5	929.5	92.95	7.05
0,08	49	979	97.90	2.1
Fond	7.5	986.5	98.65	1.35

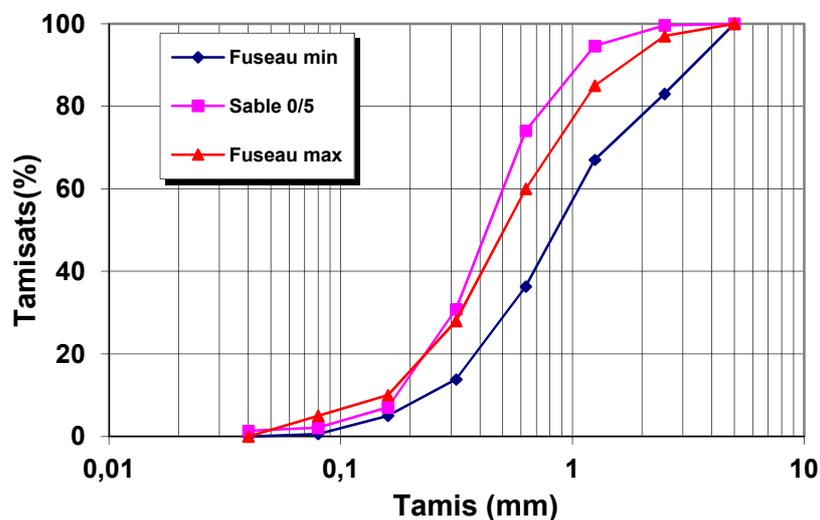


Figure III.1 Courbe granulométrique du sable oued souf

III.2.1.1. Module de finesse : [NF EN P 18-304]

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25

et 3.15mm] sur 100 et calculé par la relation suivante : $M_f = \sum R_c / 100$ où : R_c est le refus cumulé.

Les normes soviétiques spécifient de M_f des sables comme suit :

Tableau III.2. Classification de sable en fonction du module de finesse

Qualité du sable	Module de finesse
Sable gros	>2.5
Sable moyen	$2 \leq < 2.5$
Sable fin	$1.5 \leq < 2$
Sable très fin	$1 \leq < 1.5$

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

$M_f = 1.94$. Donc le sable utilisé est considéré comme **un sable fin**.

III.2.2 Caractéristiques physiques du sable utilisé :

III.2.2.1 Masse spécifique (absolue) : [NF EN P 18-555]

Pour étudier la formulation d'un béton, il est plus évident de travailler avec les quantités de composants d'après leur masse plutôt qu'avec leur volume.

Mode opératoire :

La masse volumique absolue du sable est déterminée à l'aide d'un récipient de 100 cm³ on prend 3 échantillons de masse de 300g.

Tableau III.3 : La masse absolue de sable

Essais	M_g	V_e (ml)	V (ml)	ρ ($\frac{g}{cm^3}$)
1	300	400	515	2.513
2	300	400	520	
3	300	400	519	

III.2.2.2 Masse volumique apparente [NF EN P 18-555]

Masse volumique à l'état lâche :

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 1 litre.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide de capacité de 0.1l, soit M_1 ce poids.

- En place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15cm, et on le remplit avec du sable.
- On nivelle la surface du sable et on pèse le tout, soit M_2 ce poids

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

$$\gamma_{app} = (M_2 - M_1) / V_R \quad (V_R = \text{volume de récipient})$$

Tableau III.4 : La masse volumique apparente de sable

N ° d'essai	M(g)	V (ml)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app moy}$ (kg/l)
1	1617	1000	1.617	1.62
2	1619		1.619	
3	1615		1.41	

III.2.2.3 Porosité et compacité et indice des vides [NF EN P- 554]

Pour le sable d'oued souf, les valeurs sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.5 : Porosité, compacité et indice des vides.

Porosité (%)	La compacité (%)	L'indice de vide
$P = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \times 100\%$	$C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} = 1 - P$	$E = \frac{P}{C}$
35.65	64.35	0.55

III.2.2.4 Equivalent de sable [NF EN 18-598]

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution flocculant ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment + flocculant (h_1) et du sédiment (h_2).

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100\%$$

A. Equivalent de sable visuel : (E.S.V)

Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculant jusqu'au le fond de l'éprouvette à l'aide d'une règlette.

Mesurer également avec le règlette la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

On a $E.S.V = (h_2 / h_1) * 100 (\%)$

avec h_2 : la hauteur du sable

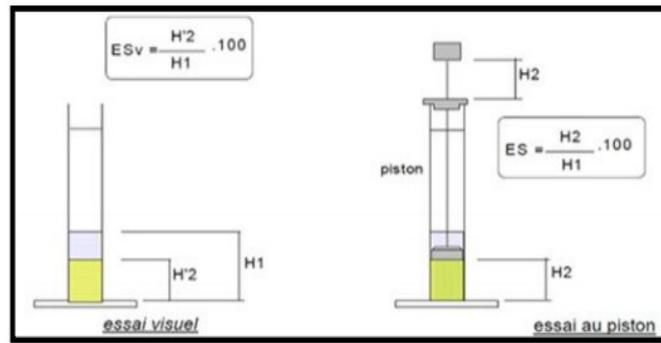


Figure III.2 : Essais d'équivalent de sable.

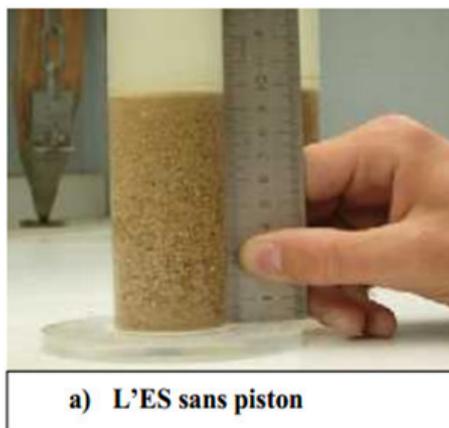


Figure III. 3.1: Essai équivalent de sable exécuté au laboratoire

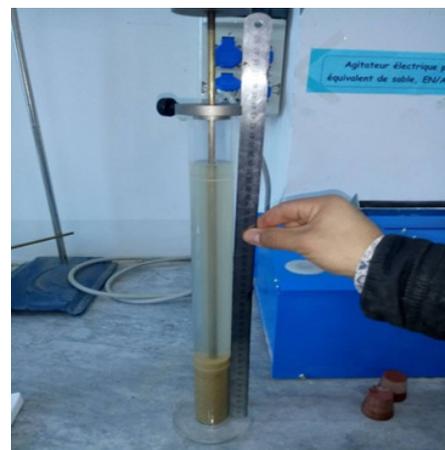


Figure III. 3.2 : Essai équivalent de sable exécutés au laboratoire.

B. Equivalent de sable piston : (E.S.P)

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

Introduire le règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que de zéro vienne buter contre la face intérieur de la tête du piston, soit h_2' la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$E.S.P = (h_2' / h_1) * 100 (\%)$ Où : h_1 : la hauteur du sable + flocculat h_2' : la hauteur du sable

Tableau III.6 : Équivalent de sable

Essais	h_1 (cm)	h_2 (cm)	E.S.V(%)	h'_2 (cm)	E.S.P(%)
1	10.8	8.8	88	8.5	85.07
2	9.6	8.6	89.58	8.4	87.5

$(E.S.V)_{\text{moy}} = 88.79 \%$

$(E.S.P)_{\text{moy}} = 86.25 \%$



C'est un sable très propre

Tableau III.7 : La classification de la nature du sable en fonction d'ES

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

III.2.3 Caractéristique chimique du sable :

La composition chimique de sable est établie en mars 2017, à la cimenterie Lafarge (M'sila). (Tableau III.8).

Tableau III.8 Composition chimique de sable

Symboles	Teneur en (%)	Symboles	Teneur en (%)
SiO ₂	92.96	Cl	0.331
CaO	0.79	Na ₂ O	0.34
Fe ₂ O ₃	2.039	MgO	0.02
Al ₂ O ₃	2.21	K ₂ O	1.16
SO ₃	0.15		

Commentaire : Noter sable est un sable pur à haute teneur en silice.

III.3 Caractéristique du gravier utilisé :

III.3.1 Origine du gravier utilisé :

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

Les fractions des graviers utilisés sont : la fraction 3/8 et la fraction 8/16

III.3.2 Analyse granulométrique :

Le même essai d'analyse granulométrique que pour le sable :

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

Tableau III.9 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
8	7.5	7.5	0.46	99.54
6,3	351.5	359	22.43	77.57
5	450.5	809.5	50.56	49.44
4	505.5	1315	82.18	17.82
3,15	263.5	1578.5	98.65	1.35
2,5	8.4	1587	99.18	0.82
Fond	4	1591	99.43	0.57

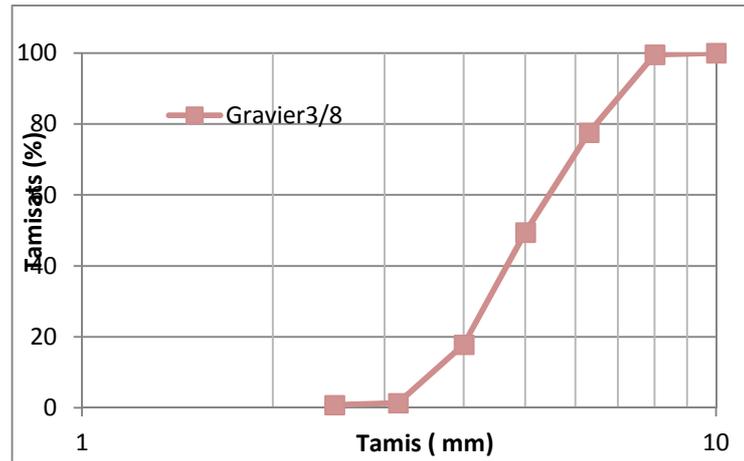


Figure III.4 Courbe granulométrique du gravier 3/8

➤ Fraction 8/16 avec $M_{G8/16}=3.2$ Kg

Tableau III.10 : Analyse granulométrique du gravier 8/16

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	0	0	0	100
12.5	706	706	30.69	69.31
10	1124.9	1830.9	57.21	42.79
8	833.5	2664.4	83.26	16.74
6.3	462	3216.4	97.7	2.3
5	62.5	3188.4	99.63	0.37
Fond	0.5	3188.9	99.65	0.34

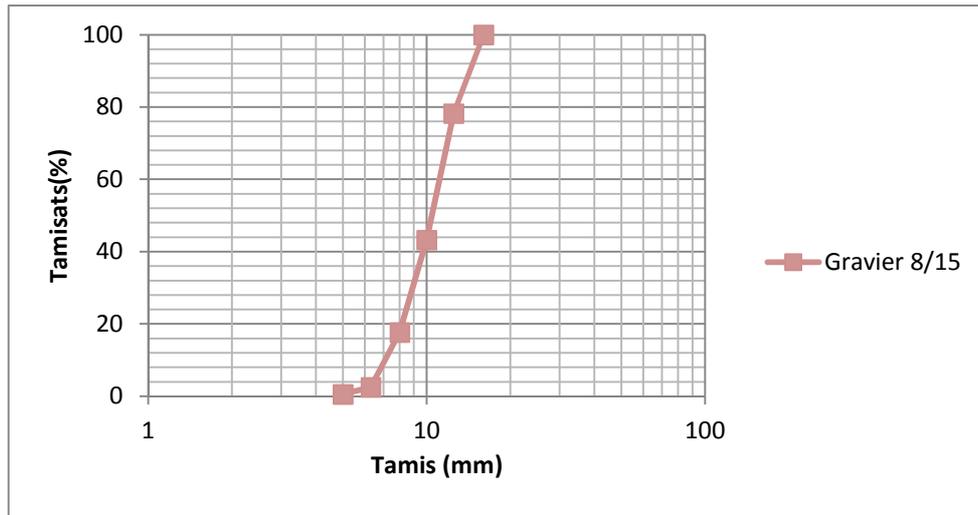


Figure III.5 Courbe granulométrique du gravier 8/15

III.3.3 Les caractéristiques physiques des graviers utilisés :

III.3.3.1 Masse volumique apparent : [NF EN P18-554]

Le principe de cette mesure s'agit de remplir un récipient de volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondant.



Figure III.6 : Récipient de mesure la masse volumique (10L et 5L)

Mode opératoire :

Verser le granulat dans le récipient choisi et le disposer sous tassement par couches horizontales successives. Puis Araser la couche supérieure du granulat à l'aide d'une règle.

La masse volumique est déterminée par la formule suivante :

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

Où :

V : volume du récipient

M₂ : poids de l'ensemble (granulat + récipient)

M₁ : poids de récipient

Tableau III.11 : Masse volumique apparente du gravier

Essais G8/16	M ₁ (Kg)	V(L)	γ (kg/l)	γ _{moy} (kg/L)
1	14.627	10	1.462	1.462
2	14.515	10	1.451	
3	14.753	10	1.475	
1	7.1325	5	1.427	1.425
2	7.117	5	1.423	
3	7.137	5	1.427	

III.3.3.2 Masse volumique absolue :

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

Tableau III.12 : La masse volumique absolue du gravier

Gravier	Essais	M(g)	V _e (cm)	V (cm)	ρ (g/cm ³)	ρ _{moy} (g/cm ³)
3/8	1	300	400	520	2.50	2.64
	2	300	400	510	2.72	
	3	300	400	511	2.70	
8/16	1	300	400	510	2.73	2.67
	2	300	400	515	2.60	
	3	300	400	512	2.68	

III.3.3.3 Compacité, porosité et l'indice de vide : [NF EN P 18-554]

Le mode opératoire est semblable à celui effectué pour le sable et les résultats sont comme suit : **Tableau III.13 : Porosité, compacité et l'indice des vides**

Fraction du gravier	Porosité P(%)	Compacité C(%)	L'indice des vides E
	$P = \left(1 - \frac{\gamma_g}{\rho_g}\right) \times 100\%$	$C = \frac{\gamma_g}{\rho_g}$	$E = \frac{c}{p}$
3/8	44.64	55.36	0.80
8/16	46.62	53.38	0.87

Tableau III.14 : l'absorption d'eau de gravier

La masse (g)	La masse sèche (g)	Absorption(%)
1000	995	0.5
1000	996	0.4

III.3.4 Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés :

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

III.3.4.1 Essai Los Angeles [NF EN P18-573] :

Le but de cet essai est de mesurer la résistance à la fragmentation d'un échantillon de granulat.

Principe de l'essai

Le principe consiste à mesurer la quantité d'éléments passant à travers un tamis de 1.6 mm, produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés, dans la machine « Los Angeles », le nombre de boulets est 11, soit environ une masse totale des boulets égale à 5000g

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité :

$$L_A = (m/M) \cdot 100$$



Figure III.7: Appareil de l'essai Los Angeles

Mode opératoire :

- ❖ Tamisage de l'échantillon à sec.
- ❖ Lavage de du matériau et son séchage à l'étuve à 105 °c jusqu'à masse constante.
- ❖ La masse de la prise d'échantillon pour essai est de 5000 g.
- ❖ Introduction avec précaution la charge de boulets correspondant de la classe granulaire choisie au nombre de 11, puis l'échantillon pour l'essai.
- ❖ Faire effectuer à la machine 500 rotations à vitesse régulière (30 tr /mn)
- ❖ Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- ❖ Tamiser le matériau sur le tamis de 1,6 mm.
- ❖ Laver le refus au tamis de 1,6 mm égoutter et sécher à l'étuve à 105 °c jusqu'à masse constante, pesé ce refus une fois séché, soit, **m'** le résultat de la pesée.

Où : $m = 5000 - m'$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

Tableau III.15 : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé

Gravier	Masse initiale M (kg)	Masse m (kg)	Coefficient de los Angeles L_A (%)
8/16	5	3.371	32.58

✓ **Classification :**

Un tableau de classification a été déjà tracé. Il permet de classer les roches en fonction du coefficient Los Angeles.

Tableau III.16 : 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 (8/16) : c'est un gravier **Mis dure** ($L_A=32.58\%$) (30 à 40), se trouve dans l'intervalle des graviers admissible.

III.5 CIMENT :

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

III.5.1 Caractéristiques du ciment CEM II/B 42,5 :**III.5.1.2 Caractéristiques physiques du ciment utilisé EN 196-1, (2002):****Tableau III 17: Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5.**

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

III.5.1.3 Caractérisation chimique et minéralogiques du ciment utilisé (CEM II/B 42.5) :**Tableau III.18 Les compositions chimiques du CEM II/B 42.5 :**

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Mgo	So ₃	Na ₂ O
Teneur	20.7	4.75	62.92	3.75	1.90	1.98	0.09

Tableau III.19 Les compositions minéralogiques du ciment CEM II/B 42.5 :

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur (%)	59	14	6	100

III.6. Le Filler calcaire :

L'addition calcaire provient de la carrière de Constantine.

III.6.1 Caractéristiques physiques et chimiques du calcaire : issues à partir des essais au laboratoire de la cimenterie d'Ain Lkbira à Sétif

Tableau III.20: La composition chimique et les propriétés physiques du filler calcaire

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Valeurs	Unité
CaO	57,60	Densité absolue	2.80	g/cm ³
Al ₂ O ₃	0,07	Densité apparente	0.86	g/cm ³
Fe ₂ O ₃	0,00	S.S.B	8000	cm ² /g
SiO ₂	0,13	D ₁₀	1.1	µm
Mgo	0,13	D ₅₀	4.06	µm
Na ₂ O	0,06	D ₉₀	28.67	µm
K ₂ O	0.00	I ₂₈	0.74	/
CL ⁻	0,002	I ₉₀	0.76	/
SO ₃	0,02			
P-A-F (1000°C)	41,98			



Figure III.8: Poudre de calcaire

III.6. Poudre de céramique blanche :

L'addition déchet de céramique blanche après broyage :

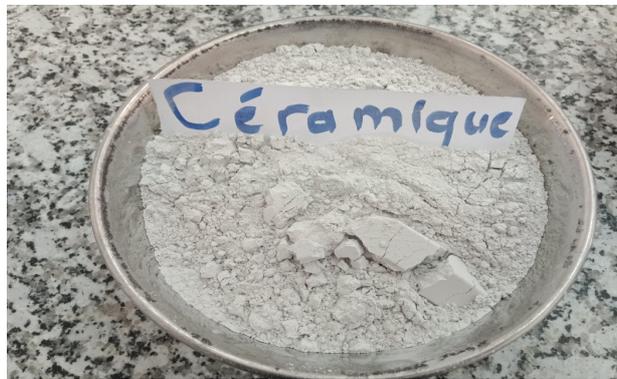


Figure III.9: Poudre de céramique blanche

III.6.1 Caractéristique physique et chimique de la céramique :

Tableau III.21 : La composition chimique et les propriétés physiques de la poudre de céramique

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Valeurs	Unité
SiO ₂	69.36	Densité absolue	2.60	g/cm ³
Al ₂ O ₃	20.50	Densité apparente	0.86	g/cm ³
Fe ₂ O ₃	0.74	S.S.B	6000	cm ² /g
CaO	1.72			
Mgo	2.73			
SO ₃	0,02			
K ₂ O	2.36			
Na ₂ O	1.20			
Cl	-0.01			
P-A-F (1000°C)	1.37			

III.8 Les Adjuvants :

Nous avons utilisé un type des adjuvants super plastifiant « **MEDAFLOW 30** » fabriqué par la société Granitex à Oued Smar Alger (**Tableau III.22**).

III.8.1 Description :

Le « **MEDAFLOW 30** » est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Et permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

Tableau III.22 : Caractéristique de l'adjuvant « MEDAFLOW 30 ».

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

III.8.2 Propriétés :

Tableau III.23 : Propriétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci.

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

III.9.L'eau de gâchage : [EN 1008]

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

Tableau III.24 : Analyse chimique de l'eau utilisée.

Paramètre	Quantité	Commentaire
Ph	7	Acceptable pour le gâchage.
Conductivité	1250 $\mu\text{s}/\text{cm}$	
Taux de (Cl)	0.24mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO_2^-)	0,15 mg/l	> à la concentration max (0.1)
Taux de (NO_3^-)	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Turbidité	1,44 NTU	
Dureté total	6,72 °F	15-50
Résidu sec	100 mg/l	

III.10.Formulation de béton auto plaçant par la méthode LCPC

III.10.1 Méthode française (LCPC)

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC), ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange,

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante : La proportion de liant est fixée à priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple) le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du

LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.

Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé :

La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante, les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

III.11. Calcul des constituants d'un BAP

❖ Les données de base :

On a choisi :

- $G/S=0,9$.
- On fixe le rapport $E/(C+F)=0,38$.
- Le dosage de saturation en super plastifiant est 1.2% de la masse de (ciment + filler) déduit à partir de l'essai de mini-cône.

Tableau III.25 : Dosage de superplastifiant de la masse de (ciment + filler)

Superplastifiant					
Densité (G sup)	Teneur en Solides (s)(%)	$M_{sec}=c*d/100$	$V_{liq}=M_{sol}*100/s*G_{sup}$	$VE=V_{liq}*G_{sup}*(100-s)/100$	$V_{sol}=V_{liq}-VE$
1.07	30	5.28 Kg/m ³	16.32 Kg/m ³	12.22 l/m ³	4.1 l/m ³

❖ Composition de la formulation de base du BAP (béton témoin)

-Le volume de la pâte pour 1m³ du BAP égale à

-400 kg/m³ du ciment.

-40 kg/m³ Ajout (calcaire) (10% du poids de ciment).

- $E/(C+F)=0,38$

- $G/S=0.9$

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

On a:

- ✓ $C=400 \text{ kg/m}^3$.
- ✓ Calcaire =40 kg/m³
- ✓ $E/(C+F)=0,38$ donc $E=0,38x(400+40)$ $E= 167.2 \text{ l/m}$
- ✓ Le volume de la pâte : $V_{pâte}=304.906 \text{ l/m}^3$

Sachant que : $V_{total} = V_{air}+V_G+V_{Pâte}$, on aura donc $V_G=670.093 \text{ l/m}^3$

- ✓ D'une autre part, on a $G+S=670.094$ l où : G est le volume du gravier et S est le volume de sable. Donc $G=670.0931-S$ et $G/S = 0.9$ alors $G= 0.9S$

$$0.9S+S=670.094 \text{ d'où on trouve } S = 352.681 \text{ l/m}^3 \text{ et } G=317.4120 \text{ l/m}$$

- ✓ Le dosage en super plastifiant est 1.2% de la masse ciment et filler

$$SP=0.012 (400+40). \text{ Donc } SP=5.28\text{kg/m}^3$$

L'extrait sec du super plastifiant (poly carboxylate) est de 30%.

Donc la quantité d'eau provenant du super plastifiant

$$VE = \frac{16.32 \times 1.07 \times 70}{100} = 12.22 \text{ l/m}^3$$

Donc la quantité d'eau utilisée par 1m^3 est de 154.98 l/m^3

On utilise les masses spécifiques des granulats pour déterminer leur dosage en Kg

- ✓ **Gravier : de gravier 3/8 ($\rho_{abs3/8} = 2.64$) et gravier 8/16 ($\rho_{abs} = 2.67$)**

Tableau III.26 composition d'un mètre cube de BAP formulé par la méthode LCPC

Constituants	Quantité	Unité
Sable	885.23	kg/m^3
Gravier 3/8 (40%)	335.19	kg/m^3
Gravier 8/16 (60%)	508.49	kg/m^3
Ciment	400	kg/m^3
Eau	154.98	kg/m^3
Super plastifiant	16.32	kg/m^3
filler de calcaire 10%	40	kg/m^3

Composition de 36 l de béton formulé par la méthode LCPC :

- ✓ **Béton témoin 10% calcaire** : quantité nécessaire de 0.036m^3

Tableau III.27 Composition des bétons témoin pour confection 36 l en Kg

Constituants	Quantité	Unité
Sable	31.86	Kg
Gravier 3/8	12	Kg
Gravier 8/16	18.22	Kg
Ciment	14.4	Kg
Eau	5.57	Kg
Super plastifiant	0.598	Kg
filler de calcaire 10%	1.44	Kg

Composition de 36 l de BAP modifié formulé par la méthode LCPC

Sachant qu'on a ajouté des pourcentages différents de poudre de céramique blanche à 2%, 7% et 14% comme addition à la composition de base citée précédemment, en faisant, en même temps, varier la granulométrie du sable vis-à-vis des particules fines en pourcentages différents. La préparation du sable s'articule sur les pourcentages des différents diamètres déduits à partir de l'analyse granulométrique et ce en se limitant à additionner plus de sable fin (le sable compris entre 0,63 et 0,08 mm), ou au contraire, à le retrancher donc moins de sable fin comme suit :

Sable1 : faire ajouter 5% des deux fractions composées (2% de $315\ \mu\text{m}$ et 3% de $160\ \mu\text{m}$), par rapport à leur pourcentage granulométrique et retrancher en quantité égale le gros sable (au-delà de 0,63mm) pour garder le même volume dans la formulation du béton,

Sable2 : faire le même travail avec 7% (3% de $315\ \mu\text{m}$ et 4% de $160\ \mu\text{m}$)

Sable3 : faire retrancher 5% des deux fractions composées (2% de $315\ \mu\text{m}$ et 3% de $160\ \mu\text{m}$), par rapport à leur pourcentage granulométrique et ajouter en quantité égale le gros sable (au-delà de 0,63mm) et répéter la même opération avec 7% (3% de $315\ \mu\text{m}$ et 4% de $160\ \mu\text{m}$)

Dans ce qui suit, on va regrouper les différentes formulations associées pour chaque variante.

Tableau III.28 composition d'un mètre cube de BAP (10%Ca+2%Céramique) formulé par la méthode LCPC

Constituants	Quantité	Unité
Sable	874.735	kg/m ³
Gravier 3/8	331.16	kg/m ³
Gravier 8/16	502.39	kg/m ³
Ciment	400	kg/m ³
Eau	153.62	kg/m ³
Super plastifiant	16.623	kg/m ³
filler de calcaire 10%	40	kg/m ³
Céramique	8	kg/m ³

Tableau III.29 Composition des différents bétons pour confection 36 l en Kg

Constituant	BAP (2%PC)	BAP (7%PC)	BAP (14%PC)
Sable	31.485	30.529	29.17
Gravier 3/8	11.921	11.844	11.05
Gravier 8/16	18.085	17.537	16.758
Ciment	14.4	14.4	14.4
Eau	5.530	5.777	6.803
Super plastifiant	0.597	0.6255	0.736
calcaire 10%	1.44	1.44	1.44
Céramique	0.288	1	2.016

III.12 Procédure de fabrication des éprouvettes :

Les éprouvettes ont été fabriquées au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamad el Bachir El Ibrahim et les tests sont effectués au même laboratoire. La préparation du béton auto plaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- ❖ Vérifier en premier le nombre et l'état des moules cylindrique et cubique nécessaires pour les essais, ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- ❖ Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- ❖ Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, si non les sécher préalablement dans l'étuve.
- ❖ Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée, le super plastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- ❖ Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, poudre de céramique, filière de calcaire) et les introduire dans le malaxeur.
- ❖ La fabrication des gâchées est effectuée dans un malaxeur à axe vertical de capacité **40L** un mode opératoire strict et identique est suivi :
- ❖ Brassage à sec du mélange sable + Gravier + ciment +poudre de céramique + filière de Calcaire) pendant **30s**.
- ❖ Ajout de l'eau + super plastifiant **210 s**.
- ❖ Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- ❖ Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration pour le béton auto plaçant.



Figure III.10 : Malaxeur à béton laboratoire de GC.

III.13 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais :

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

III.13.1 Essai au mini-cône (NF EN 1961)

- **Le but de l'essai**

C'est un essai qui nous permet d'avoir l'état de saturation de tel ciment en présence d'un adjuvant fluidifiant ou super plastifiant, afin de déterminer le rapport E/L qui convient.

- **Le principe de l'essai**

L'essai consiste à la caractérisation de la pâte du ciment à l'état frais, un mini-cône inspiré du cône d'Abrams et dont les dimensions lui sont proportionnelles servira essentiellement à la détermination des diamètres d'étalement sur une plaque plane horizontale en fonction des paramètres de composition, ces diamètres sont mesurés après 1 minute d'étalement. Le principal avantage de cet essai consiste dans la facilité et la rapidité d'exécution puisqu'il ne nécessite qu'une faible quantité de matériaux (volume inférieur à 40 ml et la Masse de liant égale à 220 g).

III.13.2. Essai d'étalement au cône d'Abrams [NFEN12 350-8]

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou slump flow), des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP.

➤ **Matériel nécessaire :**

- Plateau équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane (type table DIN) Constituant un carré d'au moins 90 cm de côté
- Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa base afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur.
- Mètre ou règle de 90 cm.

➤ **Mode opératoire :**

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône.

- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesurer le diamètre de la galette.
- Noter le résultat.

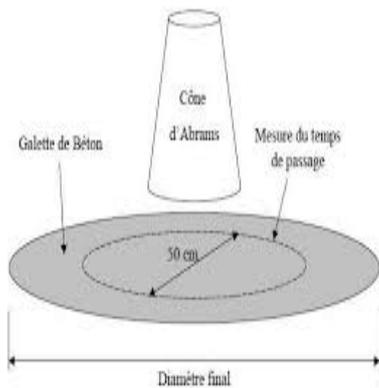


Figure III.11 : Essai au cône d'Abrams

III.13.3 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 III.12**) et de vérifier la mise en place du béton et de s'assurer qu'il ne sera pas contrarié par des phénomènes de blocage inacceptables.

Mode opératoire :

- Prélever un échantillon de béton représentatif ;
- Remplir entièrement la partie verticale de la boîte en béton en déversant de manière continue (le volume nécessaire est d'environ 13 litres) ;
- Après arasement, laisser le béton reposer pendant une minute ;
- Soulever la trappe verticalement.
- Laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage.
- Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 .

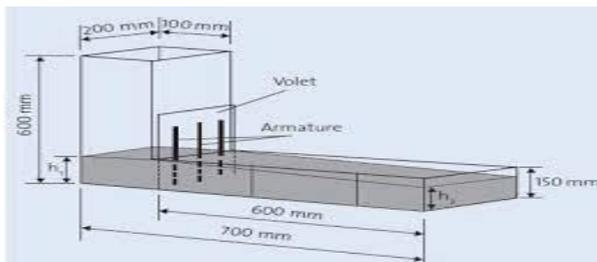


Figure III.12 : Essai de boîte en L.

III.13.4 Essai de stabilité au tamis : [NF EN 12 350-11]

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité du béton livré sur chantier.

➤ Matériel utilisé :

- Seau de 10 L + couvercle
- Tamis 5 mm diamètre 315 mm + fond
- Bascule : précision minimale 20 g, portée minimale 20 kg

➤ Mode opératoire:

- Prélever un échantillon de béton de 10 litres juste après le malaxage ;
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation ; Attendre 15 mn ;
- Peser le fond et le tamis à vide ;
- Peser le fond seul ;
- Poser le tamis + fond sur la balance et faire la tare ;
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire ressurgissant à la surface du seau après 15 minutes ;
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4.8 kg (tolérance ± 0.2 kg), verser ce béton au centre du tamis d'une hauteur de chute de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$;
- Noter le poids de l'échantillon ;
- Attendre 2 mn ;
- Peser le fond avec la laitance : on a $P_{\text{laitance}} = P_{\text{fond+laitance}} - P_{\text{fond}}$;
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P = \frac{\text{Masse de laitance}}{\text{Masse de l'échantillon}} \cdot 100$$



Figure III.13 : Essai Stabilité au tamis 74xecute au laboratoire

III.13.5 Essais de rhéomètre I CAR (mesure seuil de cisaillement et viscosité)

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

a-Description de l'appareil :

Le rhéomètre ICAR a été développé par Eric P. Koehler en 2007. Il est composé de 3 parties :

- Un récipient cylindrique d'une hauteur $H= 30$ cm et d'un diamètre $D= 30,5$ cm.
- Une pale en acier d'une hauteur $h= 12,5$ cm et d'un diamètre $d= 12,5$ cm.
- Un agitateur.

b-Procédure d'essai :

- Une fois le récipient est rempli de béton, on émerge la pale dans le récipient et le béton sera cisailé en imposant le profil vitesse.
- L'essai est fait en moins d'une minute.



Figure III.14 : Essais rhéomètre

III.14 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci :

III.14.1 Essai compression [EN 206-1] :

La résistance est déterminée à 28 jours (**Figure III.15**), par la formule : $R_c = \frac{F}{S}$

S : section de l'éprouvette : **100 cm²**.

F : force au moment de la rupture



Figure III.15 : Essai compression

III.14.2 Essais traction par flexion : [NF EN P 18-408]

- **But de l'essai :**

Cet essai a aussi pour but de déterminer la résistance à la traction du béton, c'est un essai de traction par flexion qui consiste à écraser un prismatique (**7x7x28**) de béton placé horizontalement entre deux plateaux d'une presse.

- **Conduite de l'essai :**

Lors d'un essai de flexion trois points, la poutre de béton est soumise dans sa partie supérieure à des contraintes de compression et dans sa partie inférieure à des contraintes de traction. Compte tenu que le béton résiste beaucoup moins à la traction qu'à la compression (dans un rapport de 10) l'éprouvette va se rompre dès que le béton aura atteint sa limite en traction. La contrainte limite qui découle d'un calcul classique de résistance des matériaux en élasticité est σ_{tf} (contrainte de traction par flexion). Le matériau béton n'ayant pas un comportement élastique au voisinage de la rupture, il convient d'apporter au calcul de la résistance en traction du béton σ_t un terme correctif de 0,6 ($\sigma_t = 0,6 \sigma_{tf}$) [27].

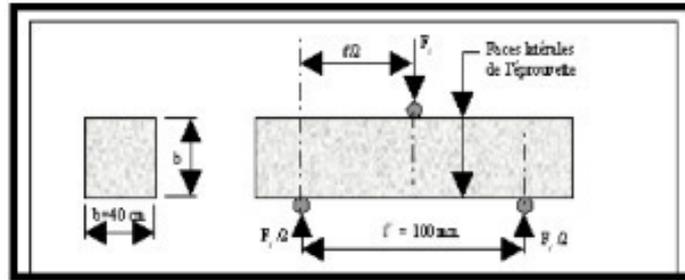


Figure III.16 : Principe de l'essai traction par flexion.

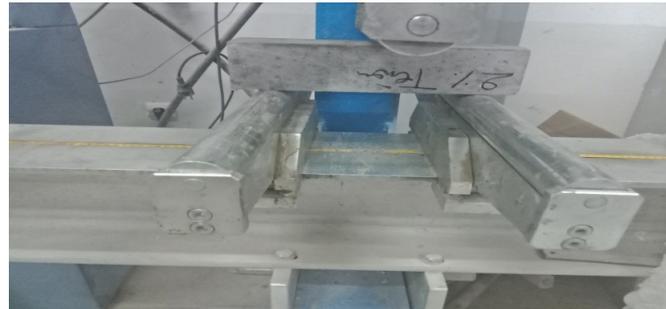


Figure III.17 : Essai Traction par flexion

III.14.3 Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NA EN 12504-2]

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

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



Figure III.18 : Principe de l'essai scléromètre.

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

Pour calculer la moyenne on a :

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

S : dureté au choc d'élément.

Si : dureté de la zone de l'élément.

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

III.14.4 Ultrason [NA EN 12504-4]

Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton (**Figure III.19**).



Figure III.19 : Appareil ultrason

III.15. Confection des éprouvettes :

III.15.1 Type et tailles des moules :

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

- ✓ Cubique (10x10x10 cm)
- ✓ Cylindrique (16x32cm)
- ✓ Prismatique (7x7x28)

III.15.2 Conservation des éprouvettes :

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

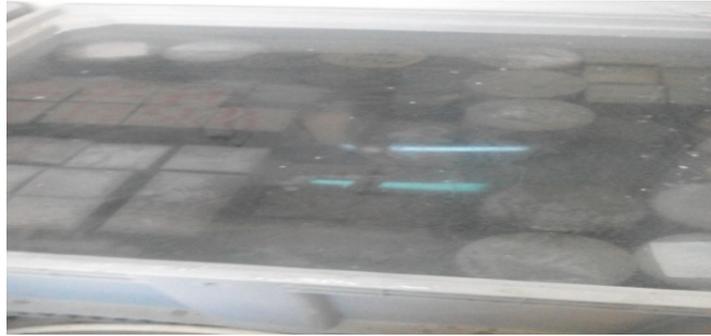


Figure III.20 : Conservation des éprouvettes

III.16 Conclusion :

Le troisième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux locaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques (Ciment, filler calcaire, poudre de céramique blanche, superplastifiant, sable et gravier.). Pour la confection du béton, les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamad EL Bachir Elibrahimi.et, nous avons détaillé tous les essais soit à l'état durci ou frais, une description sur le protocole de conception de ce type de béton ainsi que les formules de calcul et les critères fondamentaux de chaque essai est déduite.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1. Introduction

Plusieurs variables ont été utilisées dans cette étude comme les additions minérales (calcaire et céramique blanche) en différents pourcentages, dou une augmentation du volume de la pâte, combinées à une variabilité granulométrique du sable. Dans ce qui suit, on va essayer d'analyser l'influence de chaque variable séparément ou combinée sur la performance des bétons autoplaçants à l'état frais et durcis

IV.2 Les formulations des bétons réalisés sont les suivantes

Il est à noter que toutes les formulations préparées sont à base de 10% calcaire. le Tableau IV.0 accumule tous les mélanges préparés avec leurs symboles :

Tableau IV.0 différents mélanges préparés

Le mélange	Pourcentages des matériaux utilisés
BAP _{T1}	formulation de base à 10% calcaire.
BAP _{T2%PC}	+2%de poudre de céramique
BAP _{T7%PC}	+7% de poudre de céramique.
BAP _{T14%PC}	+14% poudre de céramique.
BAP _{2%PC+5%S}	+ 2% céramique + 5% de sable fin
BAP _{7%+5%S}	+7% céramique + 5% de sable fin
BAP _{14%PC+5%S}	+14% céramique + 5% de sable fin
BAP _{2%-5%S}	+2% céramique moins 5% de sable fin
BAP _{7%PC-5%S}	+7% céramique moins 5% de sable fin
BAP _{14%PC-5%S}	+14% céramique moins 5% de sable fin
BAP _{2%PC+7%S}	+2% céramique + 7% de sable fin
BAP _{7%PC+7%S}	+7% céramique +7% sable fin
BAP _{14%PC+7%S}	+ 14% céramique +7% de sable fin
BAP _{2%PC-7%S}	+2% céramique moins 7% de sable fin
BAP _{7%PC-7%S}	+7% céramique moins 7% de sable
BAP _{14%PC-7%S}	+14% céramique moins de 7% de sable fin

IV.3 Présentation de résultats :

A partir des mélanges obtenus, il faut procéder à différents essais afin de caractériser les BAP confectionnés. Pour cela, nous avons utilisé les tests recommandés par l'AFGC [5] et l'essai de rhéomètre.

➤ **Etat frais :**

Après formulation, Les essais caractéristiques sur béton frais ont été réalisés juste après le gâchage. Ce sont ceux recommandés par l'AFGC. Une étude des propriétés du BAP est établie pour vérifier le comportement à l'état frais, qui se manifeste par l'étalement pour les milieux non confiné, ainsi que son écoulement dans les milieux confiné illustré dans la boîte en L et par la stabilité au tamis en finissant par l'essai au rhéomètre.

Le tableau ci-après présente les résultats des essais rhéologiques des BAP pour différents pourcentages de sable fin et de poudre de céramique.

Tableau IV.1 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 2% poudre de céramique et différents pourcentages de sable fin

Type de béton	L'étalement (cm)	Stabilisation au tamis (%)	Boîte en L (h ₂ /h)
BAP Témoin	71	5.04	1
BAP _{T2%PC}	72	5.86	1
BAP _{2%PC+5S}	75	6.03	1
BAP _{2%PC-5%S}	71	4.18	1
BAP _{2%PC+7%S}	73	4.17	1
BAP _{2%PC-7%S}	71	4.18	1

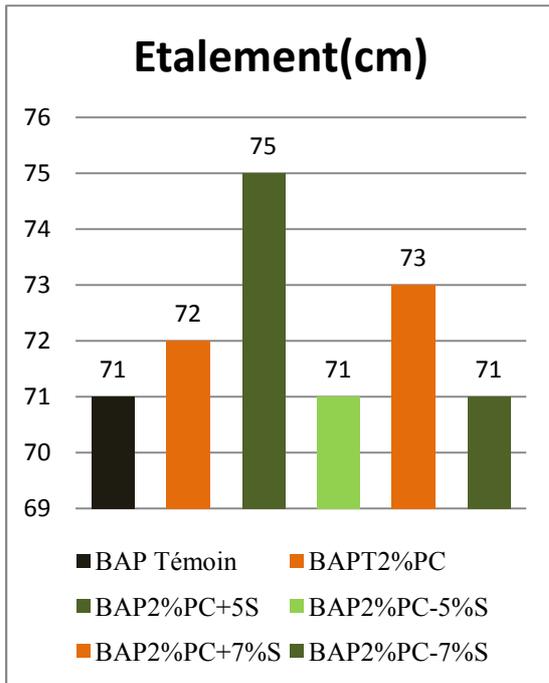


Figure IV.1 : l'étalement en fonction de type de béton2%PC

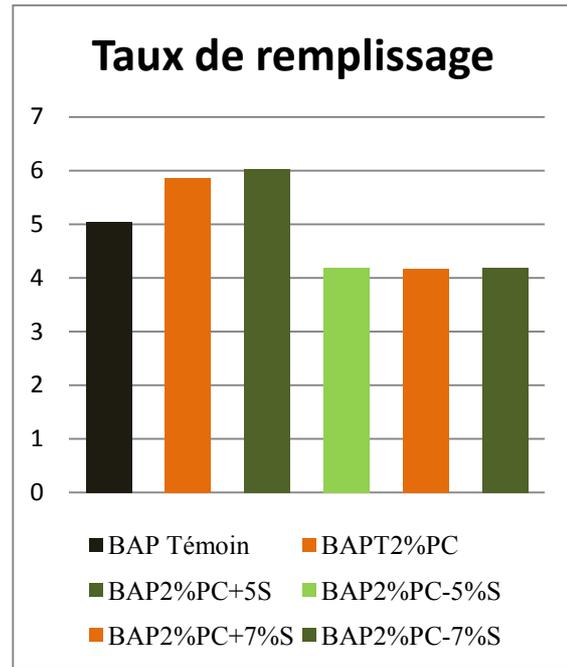


Figure IV.2 : Le taux de remplissage en fonction du type de béton2%PC

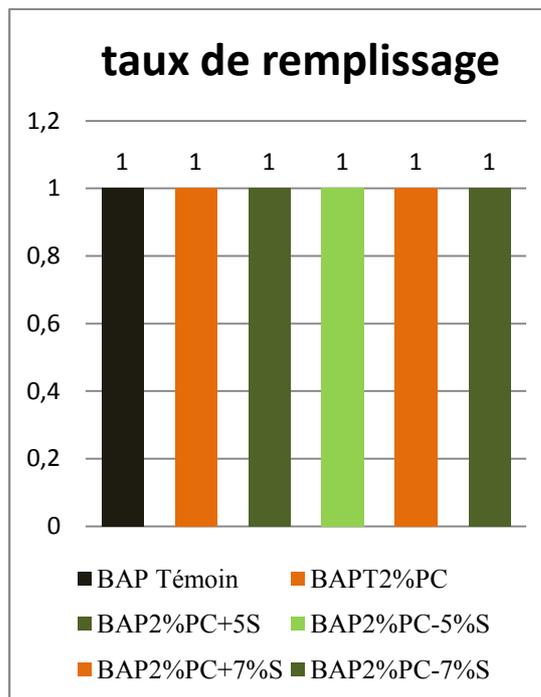


Figure IV.3 : L'indice de ségrégation en fonction du type de béton2%PC

Tableau IV.2 Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 7% poudre de céramique et différents pourcentages de sable

Type de béton	L'étalement (cm)	Stabilisation de tamis (%)	Boite en L (h ₂ /h)
BAP Témoin	71	5.04	1
BAP _T 7%PC	75	6.72	1
BAP _{7%PC+5%S}	75	5.29	1
BAP _{7%PC-5%S}	74	8.72	1
BAP _{7%PC+7%S}	75	4.52	1
BAP _{7%PC-7%S}	74	4.52	1

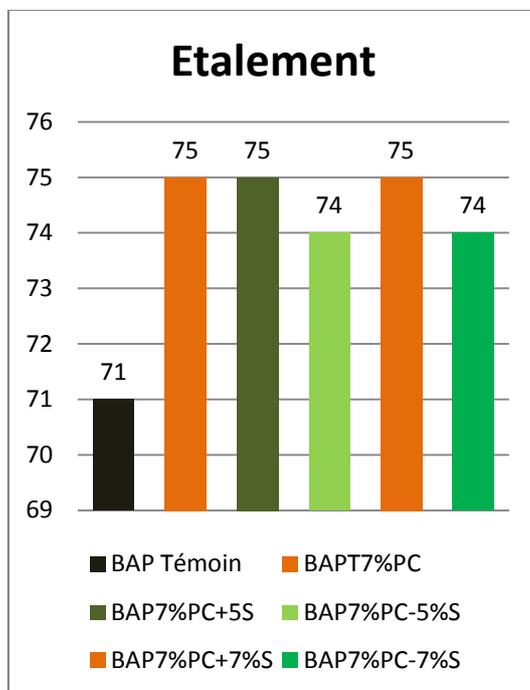


Figure IV.4 : l'étalement en fonction de type de béton 7%PC

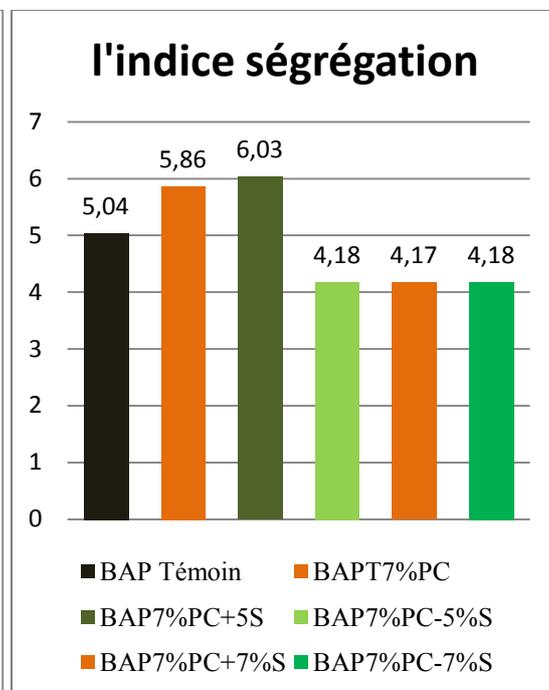


Figure IV.5 : Le taux de remplissage en fonction du type de béton 7%PC

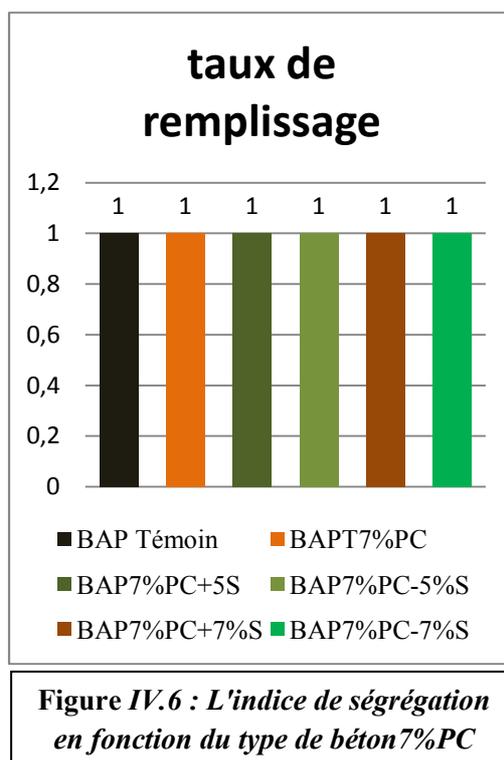


Tableau IV.3 Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 14% poudre de céramique et différents pourcentages de sable fin

Type de béton	L'étalement (cm)	Stabilisation de tamis (%)	Boite en L (h ₂ /h)
BAP Témoin	71	5.04	1
BAP _T 14%PC	75	12.02	1
BAP _{14%PC+5%S}	76	10.12	1
BAP _{14%PC-5%S}	75	11.14	1
BAP _{14%PC+7%S}	75	11.4	1
BAP _{14%PC-7%S}	75	11.42	1

D'après les résultats inscrits dans les tableaux :

Les étalements des bétons autoplaçant testés sont supérieurs à 70 cm, le taux de remplissage de la boîte en L est de l'ordre 100 %, la laitance est inférieure de 15 % selon le critère d'acceptabilité, la stabilité au tamis est considérée comme satisfaisante.

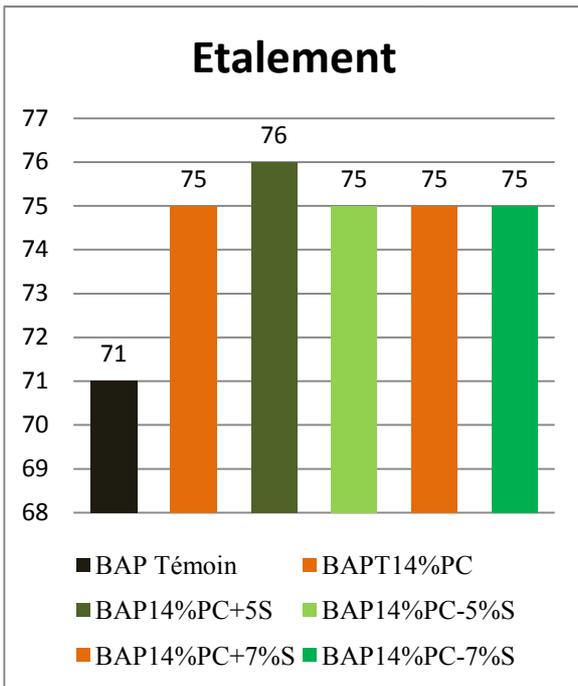


Figure IV.7 : l'étalement en fonction de type de béton14%PC

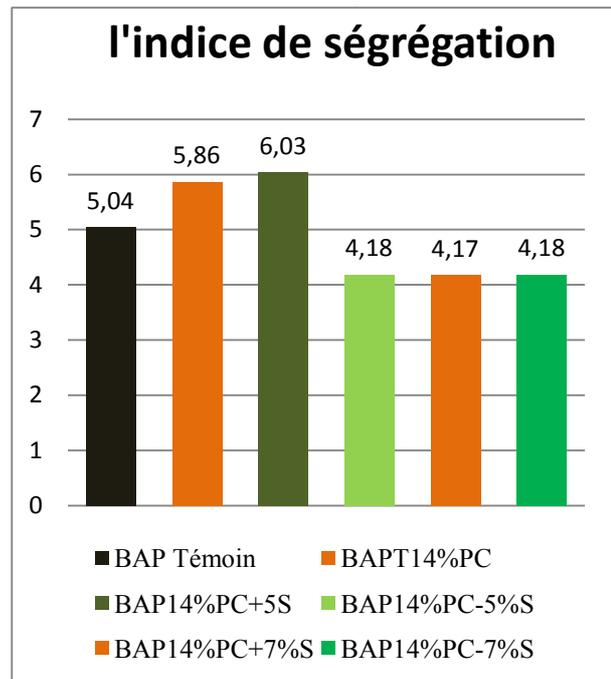


Figure IV.8 : Le taux de remplissage en fonction du type de béton14%PC

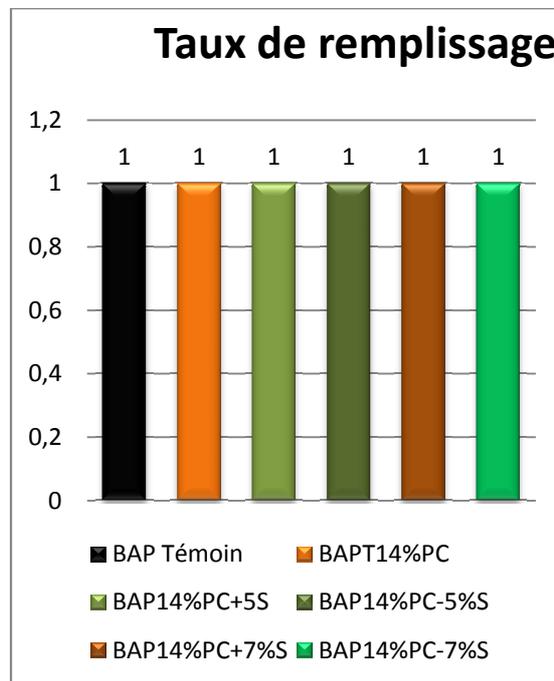


Figure IV.9 : L'indice de ségrégation en fonction du type de béton14%PC

Tous nos bétons ont présentés une bonne stabilité au tamis pas de ségrégation statique, validons ainsi, le rôle des additions pour limiter les risques de ségrégation

On remarque aussi que l'accroissement de la teneur en addition minérale n'influe pas sur la résistance à la ségrégation. Ce résultat s'explique du fait que les grains de l'addition minérale améliorent la granulométrie et la compacité des BAP, ce qui peut donner une stabilité accrue.

Les résultats trouvés par l'essai de la boîte en L, présentés sur les figures (IV.3, IV.6 nous indiquent que toutes les valeurs sont parfaites, on peut dire que ces bétons ont une bonne mobilité dans un milieu confiné et cela malgré les armatures qui font obstacle.

L'essai de stabilité aux tamis montre que on n'a pas une ségrégation malgré la grande fluidité ce qui est paradoxal à premier vue. Le tableau 3 montre que les toutes les valeurs sont inférieures à 15%.

Comme on peut voir aussi que le comportement du BAP à l'état frais s'améliore en fonction du volume de pâte (A+C). Voir Fig. 5. Cette amélioration est due au volume de pâte important qui facilite le glissement entre les grains pour donner un seuil de cisaillement très faible.

En fin on peut constater que le béton autoplaçants avec ajout respectent les critères d'étalement NF EN 12350 et les recommandations d'AFGC.

Ces propriétés sont liées au rôle des ajouts et de super plastifiant qui a une action de défloculation et dispersion des grains de ciment qui sont directement liées à l'absorption de poly carboxylates à la surface des particules en évitant l'agglomération et libérant l'eau emprisonnée dans ces agglomérats.

IV.3.2 Valeurs du seuil de cisaillement et de viscosité (paramètre de Bingham) des BAP témoins avec

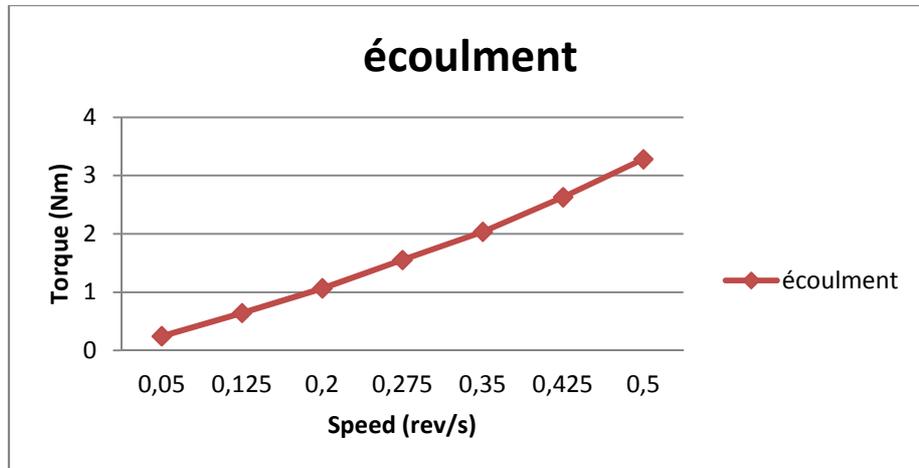


Figure IV.10 : Courbe d'écoulement des points de BAP_{T1}

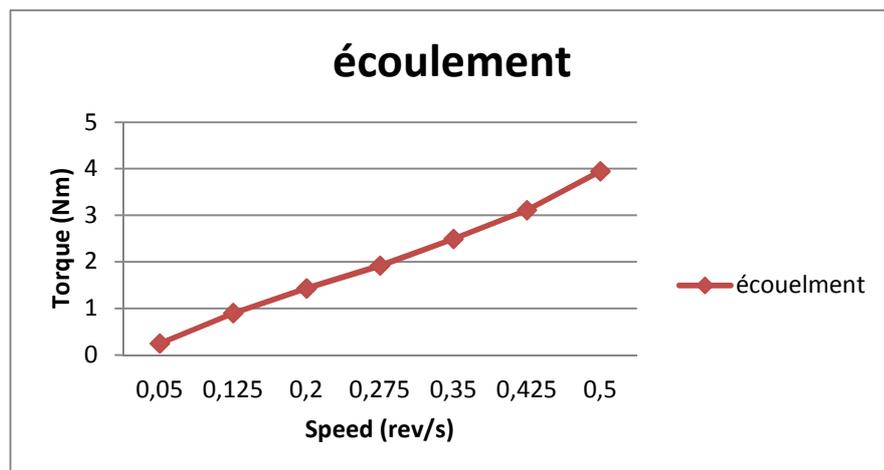


Figure IV.11 : Courbe d'écoulement des points de BAP_{T2%}

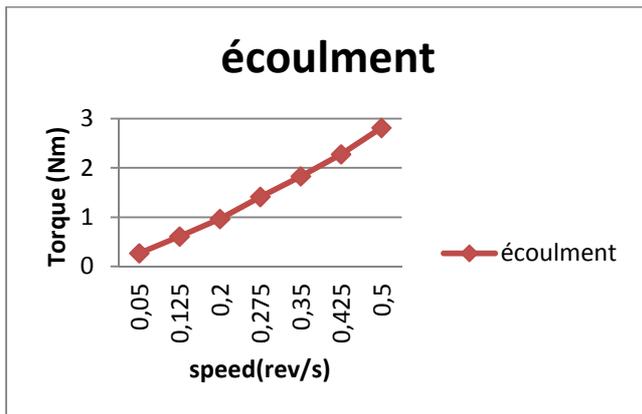


Figure IV.12: Courbe d'écoulement des points de $BAP_{T14\%PC}$

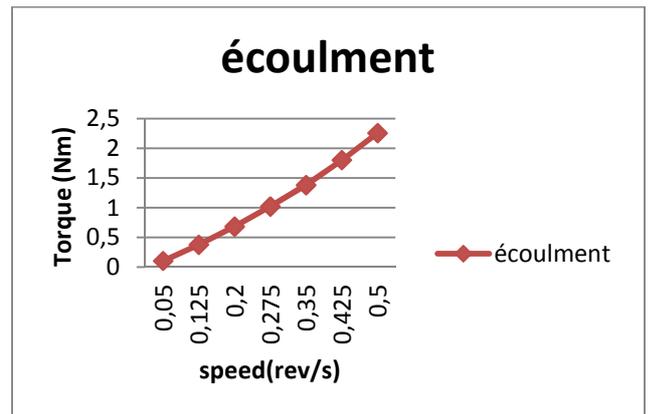


Figure IV.13 : Courbe d'écoulement des points de $BAP_{T7\%DR}$

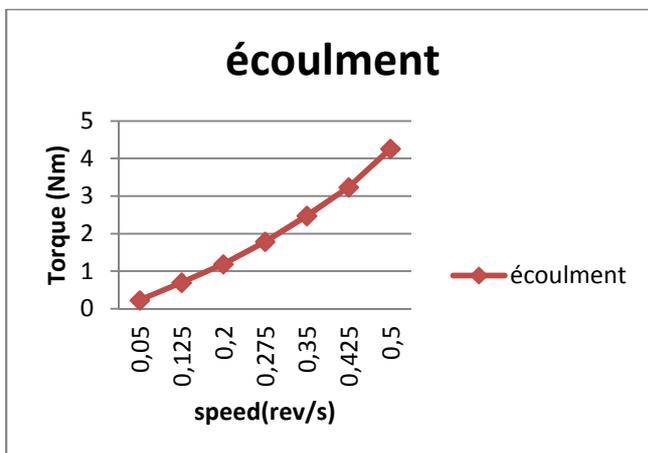


Figure IV.14 : Courbe d'écoulement des points de $BAP_{2\%PC+5S}$

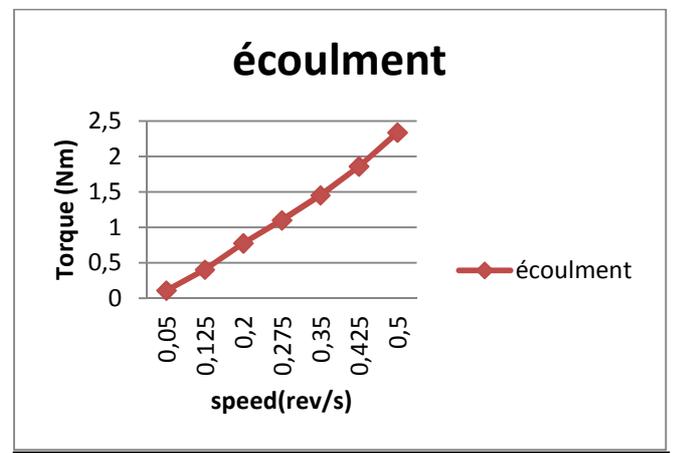


Figure IV.15 : Courbe d'écoulement des points de $BAP_{2\%PC-5S}$

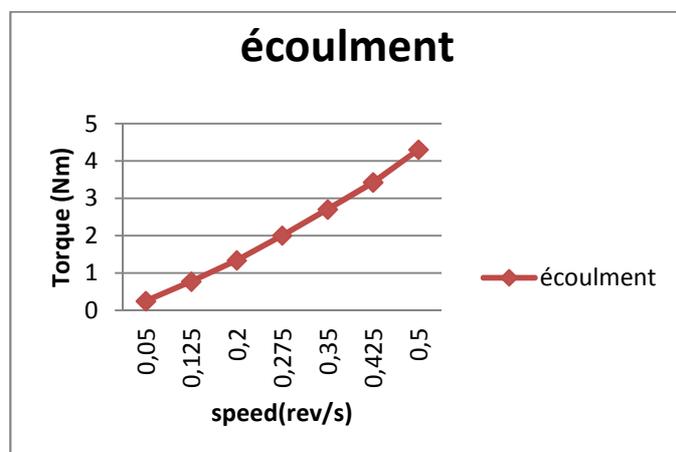


Figure IV.16 : courbe d'écoulement des points $BAP_{2\%PC+7S}$

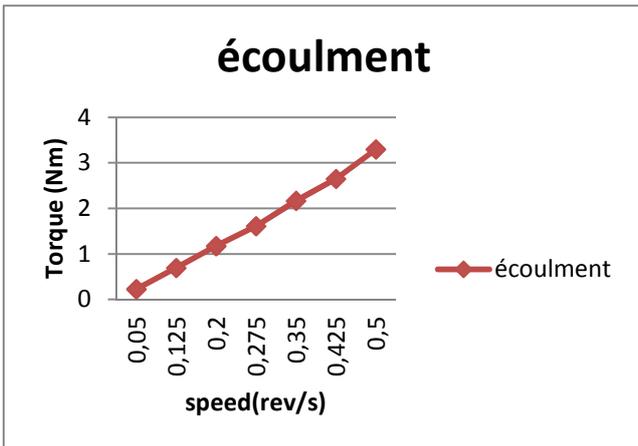


Figure IV.17 : Courbe d'écoulement des points de BAP_{2%PC-7S}

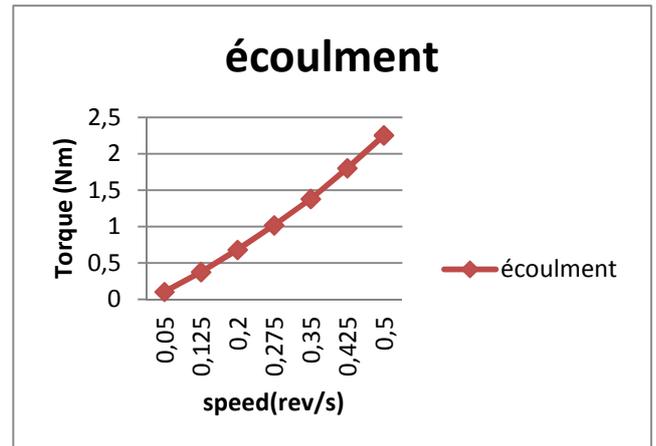


Figure IV.18 : Courbe d'écoulement des points de BAP_{7%PC+5S}

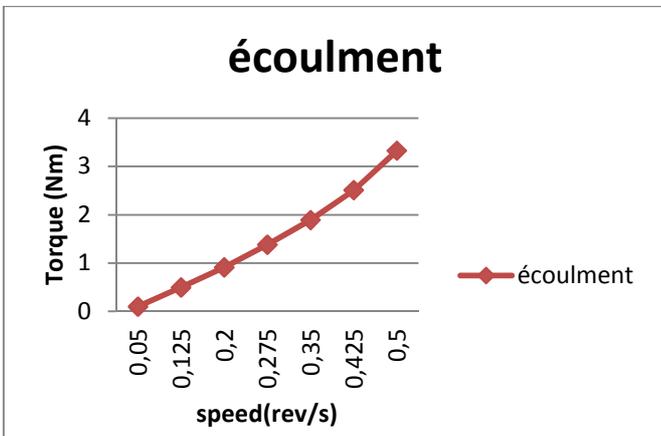


Figure IV.19 : Courbe d'écoulement des points de BAP_{7%PC-5S}

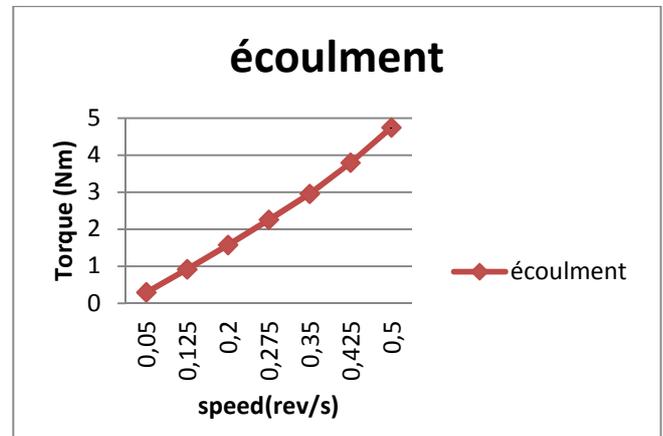


Figure IV.20 : Courbe d'écoulement des points de BAP_{7%PC+7S}

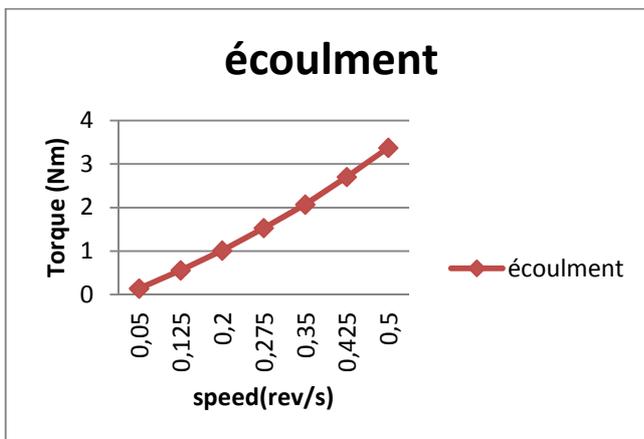


Figure IV.21 : Courbe d'écoulement des points de BAP_{7%PC-7S}

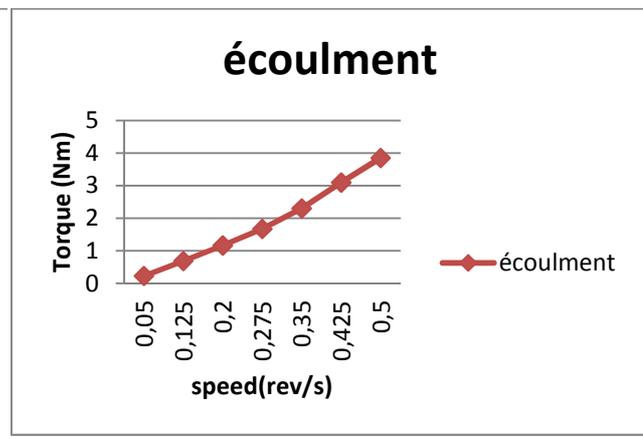


Figure IV.22: Courbe d'écoulement des points de BAP_{14%PC+5S}

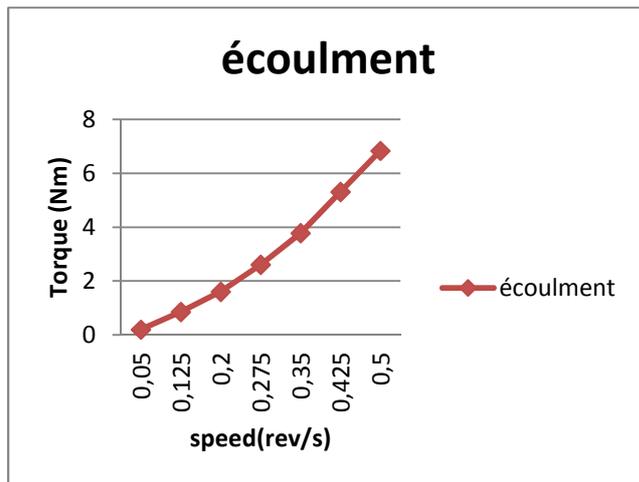


Figure IV.23 : Courbe d'écoulement des points de $BAP_{14\%PC+7S}$

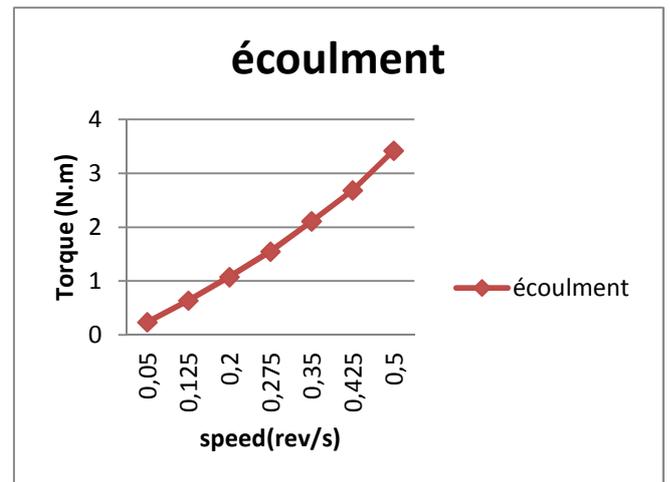


Figure IV.24 : Courbe d'écoulement des points de $BAP_{14\%PC-7S}$

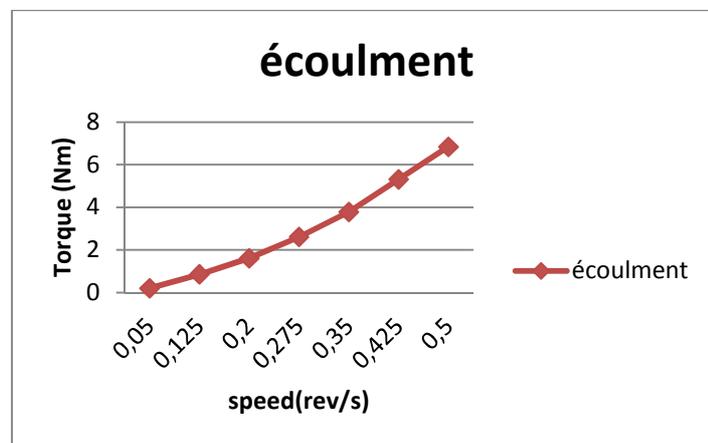


Figure IV.25 : Courbe d'écoulement des points de $BAP_{14\%PC-5S}$

Tableau IV.4 caractéristiques rhéologiques des différents BAP 2%PC mesurées par rhéomètre

Type de béton	Seuil de cisaillement (Pa)	La viscosité (Pa.s)
BAP Témoin	0.1	122.2
BAP _{2%PC}	0.1	148.2
BAP _{2%PC+5%S}	0.1	152.3
BAP _{2%PC-5%S}	0.1	86.66
BAP _{2%PC+7%S}	0.1	159.6
BAP _{2%PC-7%S}	0.1	125

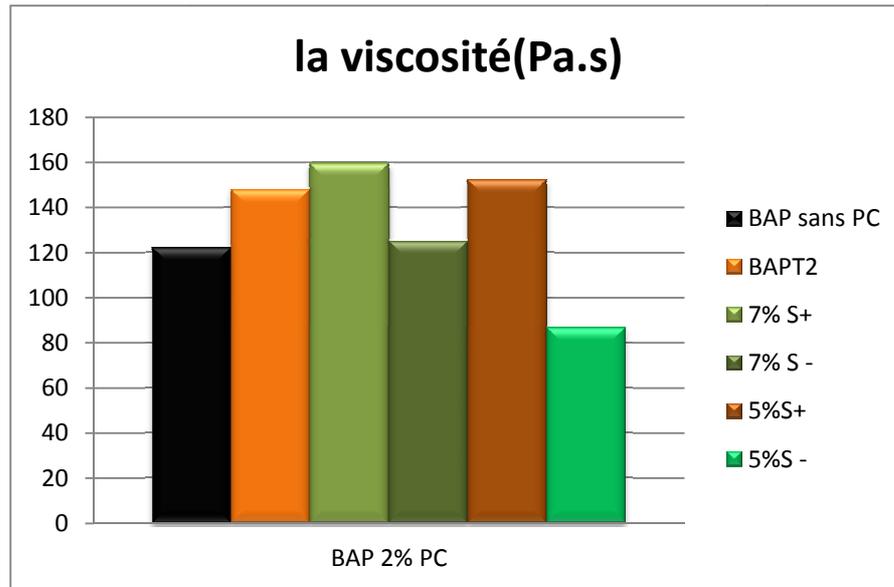


Figure IV.26 valeurs de la viscosité des différents BAP avec 2% PC

Tableau IV.5 caractéristiques rhéologiques des différents BAP 7%PC mesurées par rhéomètre

Type de béton	Seuil de cisaillement (Pa)	La viscosité (Pa.s)
BAP Témoin	0.1	122.2
BAP7%PC	0.1	106.7
BAP7%PC+5%S	0.1	242.36
BAP7%PC-5%S	0.1	118.648
BAP7%PC+7%S	0.1	176.758
BAP7%PC-7%S	0.1	96.74

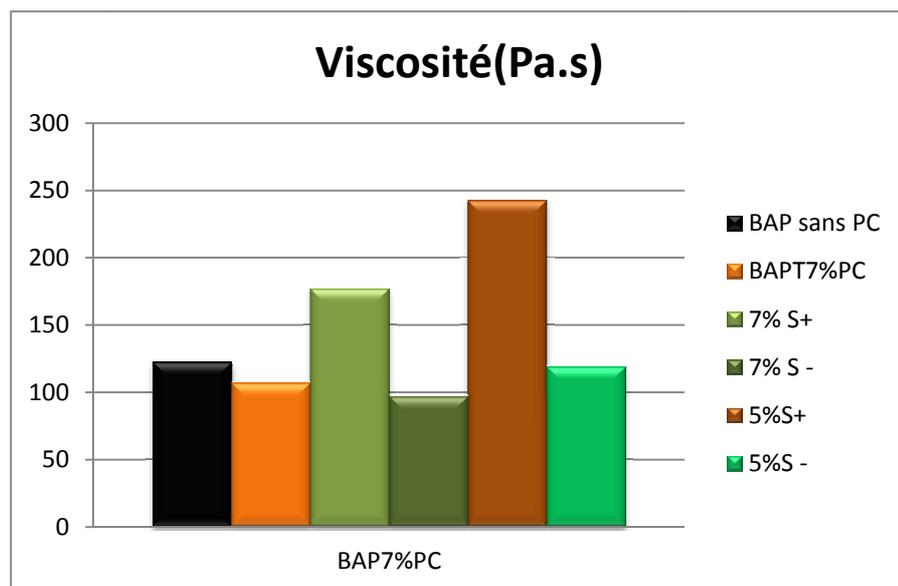
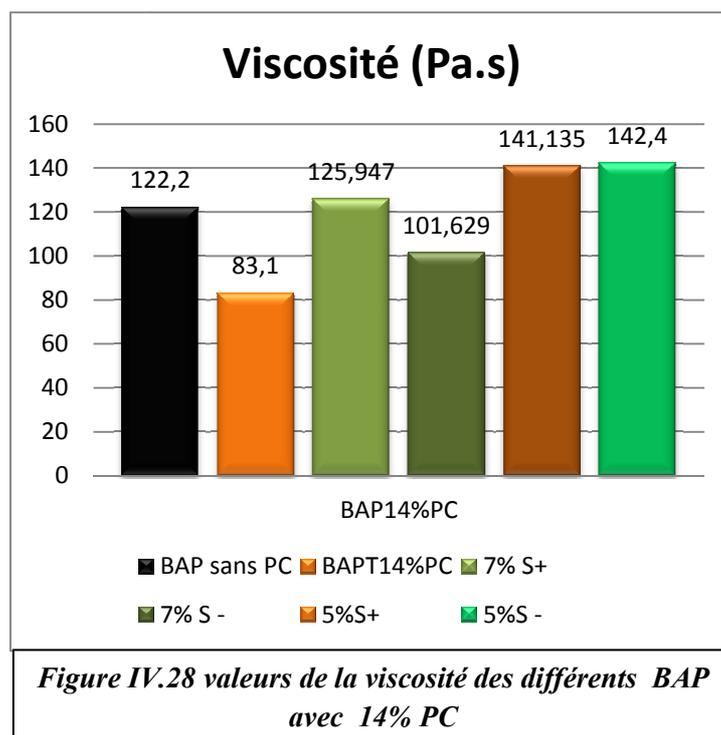


Figure IV.27 valeurs de la viscosité des différents BAP avec 7% PC

Tableau IV.6 caractéristiques rhéologiques des différents BAP 14%PC mesurées par rhéomètre.

Type de béton	Seuil de cisaillement (Pa)	La viscosité (Pa.s)
BAP Témoin	0.1	122.2
BAP _{14%PC}	0.1	83.1
BAP _{14%PC+5}	0.1	141.135
BAP _{14%PC-5}	0.1	142.4
BAP _{14%PC+7}	0.1	125.947
BAP _{14%PC-7}	0.1	101.629



Les tableaux et les figures ci-dessus résultent les paramètres déduits à partir du rhéomètre d'un BAP modifié par ajout de 2%, 7% et 14% de poudre de céramique d'où on constate des valeurs de seuil de cisaillement proches à zéro pour tous les mélanges mais une différence de valeurs concernant la viscosité par rapport au béton témoin.

Une augmentation de la viscosité de 30% pour le BAP_{2%PC+7%S} et le BAP_{2%PC+5%S}, en enregistrant en ordre une valeur de 159.6Pa.s et 152.3Pa.s de viscosité.

Pour celle du BAP_{2%PC-7%S} et BAP_{2%PC}, la viscosité augmente de 23.16% et nous remarquons également une diminution d'environ 29.08% pour BAP_{2%PC-5%S}. Une augmentation de la viscosité de l'ordre de 98.33% pour le BAP_{7%PC+5%S} et 44.6% pour le BAP_{7%+7%S}.

On trouve une diminution de la viscosité de 12.68% et 20.87% pour le BAP_{7%}; BAP_{7%PC-7%S}; BAP_{7%-5%S} où on enregistre une valeur de viscosité de 106.7Pa ; 96.74Pa ; 118.65MPa

pour tous les résultats comparés par BAP_T sans poudre céramique et valeur de la viscosité 122.2Pa.

On trouve une augmentation de la viscosité avec l'ordre 3.06% et 16.01% pour le $BAP_{14\%PC+7\%S}$; $BAP_{14\%PC+5\%S}$; $BAP_{14\%-5\%S}$ enregistre une valeur de viscosité 125.94Pa; 141.13Pa.; 142.4Pa.

Nous remarquons également une diminution d'environ 32.07% et 16.83% pour $BAP_{T14\%}$ et $BAP_{14\%PC-7\%S}$ pour tous les résultats comparés par BAP_T sans poudre céramique et valeur de la viscosité 122.2Pa.

Nous remarquons également diminution d'environ 32.07% et 16.83% pour BAP_{T4} et $BAP_{14\%PC-7\%S}$ respectivement, par rapport au BAP_T (sans poudre céramique).

Les valeurs de cet essai respectent les normes NF EN 12350 et les recommandations d'AFGC.

On peut conclure que la nature de la finesse de l'ajout a un effet sur le seuil de cisaillement et la viscosité de béton autoplaçant, vue que la surface spécifique Blaine, plus grande chez les deux additions étudiées par rapport au ciment, entraîne une augmentation des propriétés rhéologiques car la demande en eau est plus importante.

Le BAP est très visqueux avec une viscosité plastique supérieure à 80 Pa.s, le seuil de cisaillement doit être faible, afin de maintenir une fluidité adéquate. Pour des viscosités supérieures à 100 Pa.s, le seuil de cisaillement τ_0 doit être proche de zéro pour avoir une fluidité suffisante [67] qui est compatible avec nos résultats

Le BAP doit avoir un seuil d'écoulement faible pour que l'écoulement s'amorce rapidement et leur viscosité doit être modérée pour limiter le temps d'écoulement. Ces propriétés sont liées au rôle du super plastifiant permettent aux grains de ciment d'acquérir des charges identiques et créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Bonneau (1997) explique ce phénomène par la fixation des polymères à la surface des particules solide du ciment par adsorption (voire Figure I.5 chapitre 01). Cette adsorption s'effectue sur les phases hydratées du ciment ceci permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment flocculés et diminue ainsi les frictions inter granulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton. Ainsi de cisaillement et la viscosité d'un mélange cimentaire diminuent avec l'ajout d'un superplastifiant. [5]

IV.3. Le béton autoplaçant à l'état durci

IV.3.1 Béton autoplaçant +2%PC :

- Évolutions de la résistance à la compression et traction :

Tableau IV.7 : Caractéristiques mécaniques avec ajout 10%FC+2%PC

Type de béton	La résistance à la compression		
	7 jours(MPa)	14jours(MPa)	28jours(MPa)
BAP_T20%PC	53.44	54.32	60.03
BAP_{2%}PC + 5%S	56.24	62.62	64
BAP_{2%}PC-5%S	54.13	61.75	63.45
BAP_{2%}PC + 7%S	62.33	68.94	73.99
BAP_{2%}PC - 7%S	63.10	67.30	70.64
BAP_{Témoin}	48.66	58	59.16

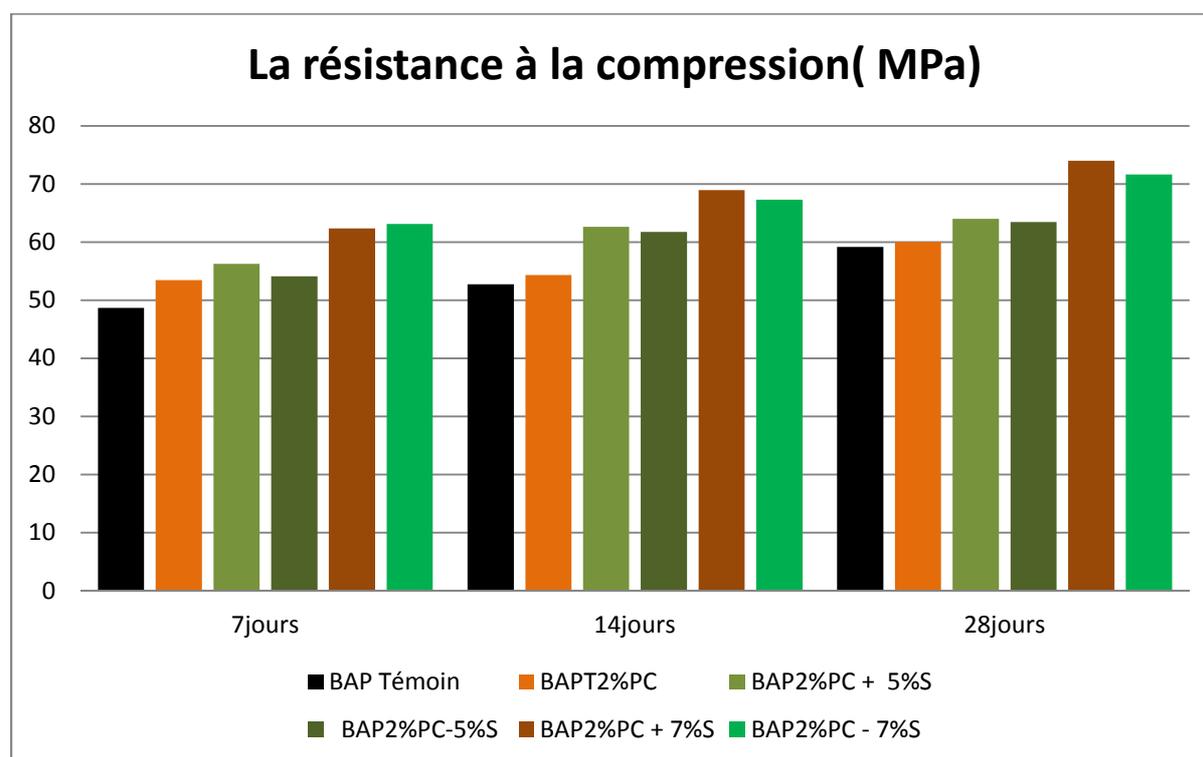


Figure IV.29. Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton BAP2%PC

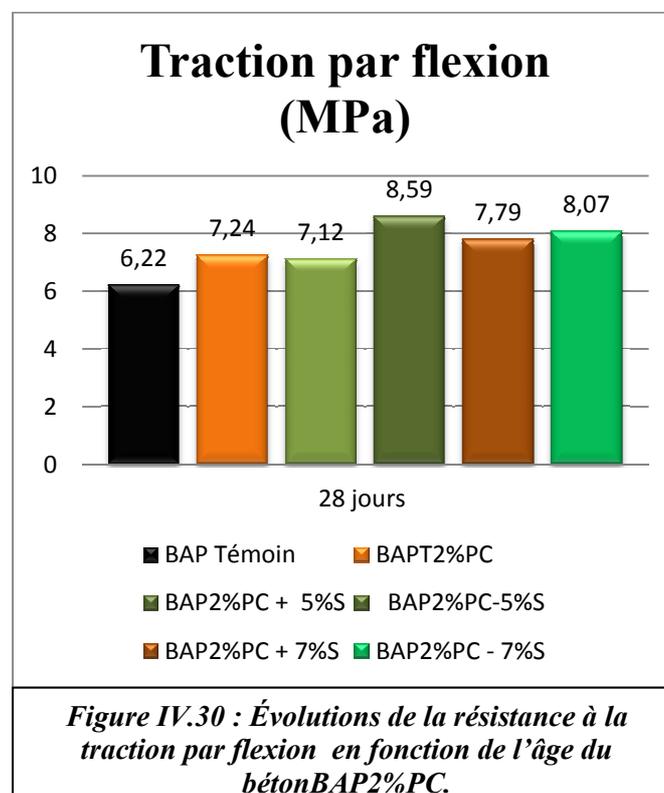
Selon le Tableau IV.7 et la figure IV.29, on remarque que le béton **BAP_{2%}PC+7%S**, enregistre une résistance mécanique R_c maximale à 28 jours (**73,99MPa**) par rapport aux autres types de bétons, et enregistre une amélioration de l'ordre de **25.6 %** comparé à l'influence de la variation du volume de pâte et le sable fin sur un BAP

témoin. Les fillers utilisés sont composés principalement de SiO₂ pour la poudre de céramique (PC) et de CaCO₃ pour le calcaire (FC). Ces éléments accélèrent l'hydratation du C3S, ce qui améliore les résistances aux jeunes âges. Cette amélioration est expliquée par la grande finesse des types d'additions, qui améliore la distribution granulométrique.

Le **BAP_{2%PC+5%S}**, donne une résistance mécanique Rc (**64 MPa**) plus convergente à celui de **BAP_{2%PC-5%S}**, cette résistance est supérieure à celui de **BAP_T** sans PC et avec 2%PC, le **BAP_{2%PC-7%S}** donne une résistance mécanique de (**71.64 MPa**).

Tableau IV.8: Caractéristiques mécaniques avec ajout 2%PC

Type de béton	la résistance à la traction
	28jours (MPa)
BAP _{T2%PC}	7.24
BAP _{2%PC + 5%S}	7.12
BAP _{2%PC - 5%S}	8.59
BAP _{2%PC + 7%S}	7.79
BAP _{2%PC - 7%S}	8.07
BAP _{Témoin}	6.22



D'après les résultats de la résistance à la flexion il y'a une légère augmentation de résistance de l'ordre de **38.10 %** pour la formulation qui contient **BAP_{2%PC-5%S}**, et de **29.74% ; 25.24% ; 16.39%** par ordre pour celle qui contient (**BAP_{2%PC-7%S}** ; **BAP_{2%PC+7%S}** ; **BAPT_{2%PC}**). Donc l'introduction de poudre du céramique jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des BAP. ceci est dû à la nature de la PC qui appartient à la famille des fillers quasi inertes. Ces fillers sont composées principalement de SiO₂. Cet élément accélère l'hydratation du C3S, ce qui améliore les résistances aux jeunes âges. Son effet a tendance à se stabiliser à long terme.

Tableau IV.9 : Caractéristiques mécaniques avec ajout 10%FC+7%PC

Type de béton	La résistance à la compression		
	7 jours (MPa)	14jours (MPa)	28jours(MPa)
BAP _{T7%PC}	51.90	52.331	63.35
BAP _{7%PC+ 5%S}	59.370	68.050	73.54
BAP _{7%PC - 5%S}	53.88	67.89	71.20
BAP _{7%PC+ 7%S}	57.94	60.12	65.41
BAP _{7%PC-7%S}	50.83	53.20	69.13
BAP _{Témoin}	48.66	58	59.16

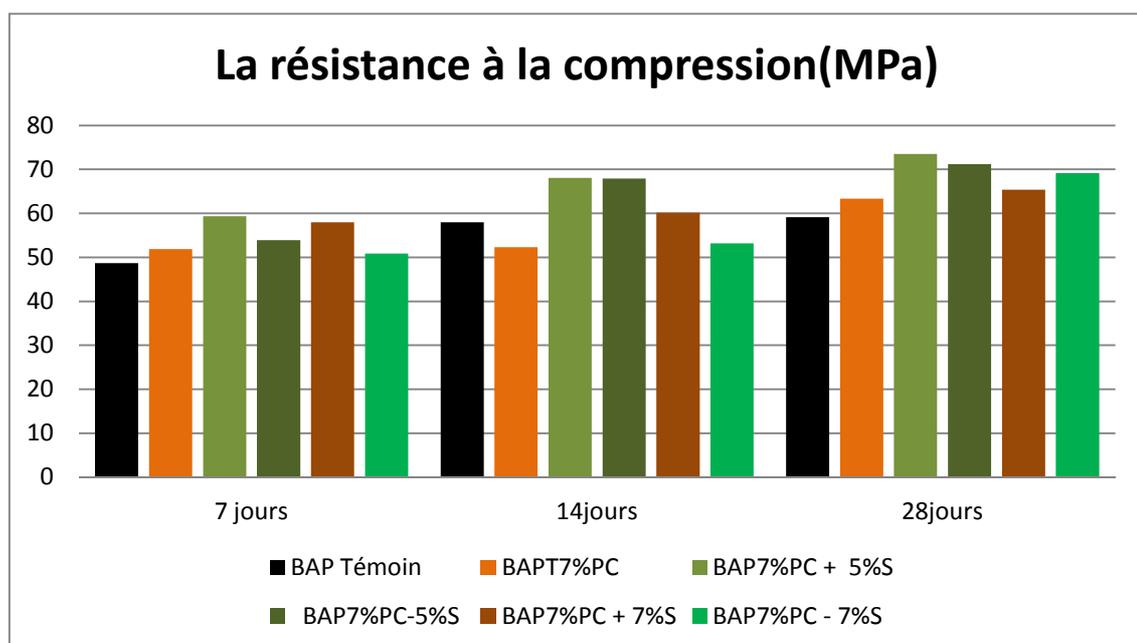


Figure IV.31 : Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton BAP7%PC.

Selon le Tableau IV.9 et la figure IV.25 on remarque que le béton **BAP_{7%PC+5%S}**, enregistre une résistance mécanique R_c maximale à 28 jours (**73,54MPa**) par rapport aux autres types des bétons, et enregistre une amélioration de l'ordre de **24.30 %** comparé au témoin. Ces fillers sont composées principalement de SiO_2 pour la poudre de céramique **PC** et $CaCO_3$ le calcaire **FC**. Ces éléments accélèrent l'hydratation du C_3S , ce qui améliore les résistances aux jeunes âges. Cette amélioration est expliquée par la grande finesse des types d'additions, qui améliore la distribution granulométrique.

Le **BAP_{7%PC-5%S}**, donne une résistance mécanique R_c (**71.20 MPa**) plus convergente à celui de **BAP_{7%PC-7%S}**, cette résistance est supérieure à celui de **BAP_T** sans PC et avec 7%PC (**59.16MPa ; 63.35MPa**), le **BAP_{7%PC+7%S}** donne une résistance mécanique de (**69.13 MPa**).

Tableau IV.10 : Caractéristiques mécaniques avec ajout 10%FC+7%PC

Type de béton	La résistance traction par flexion
	28jours (MPa)
BAP _{T7%PC}	6.56
BAP _{7%PC+5%S}	7.42
BAP _{7%PC-5%S}	7.54
BAP _{2%PC+7%S}	8.54
BAP _{2%PC-7%S}	8.77
BAP _{Témoin}	6.22

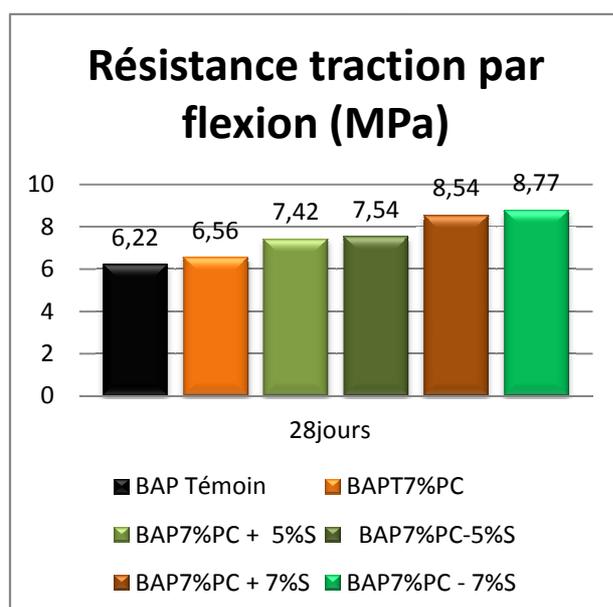


Figure IV.32 : Évolutions de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du béton BAP7%PC.

D'après les résultats de la résistance à la flexion il y'a une légère augmentation de résistance de l'ordre de 44.53% et 37.29% pour la formulation qui contient **BAP_{7%PC+7%S}** et de 19.61% ; 21.22% ; 5.46% par ordre pour celle qui contient (**BAP_{7%PC+5%S}** ; **BAP_{7%PC-5%S}** ; **BAP_{7%PC}**). Donc l'introduction de poudre de la céramique jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des BAP.

Tableau IV.11 : Caractéristiques mécaniques avec ajout 10%FC+14%PC

Type de béton	La résistance à la compression		
	7 jours (MPa)	14jours(MPa)	28jours(MPa)
BAP_{T14%PC}	53.12	60.33	63.35
BAP_{14%PC+ 5%S}	57.85	65.28	69.80
BAP_{14%PC - 5%S}	49.97	62.11	67.20
BAP_{14%PC+ 7%S}	52.104	60.56	66.78
BAP_{14%PC-7%S}	51.89	58.35	64.48
BAP_{Témoin}	48.66	58	59.16

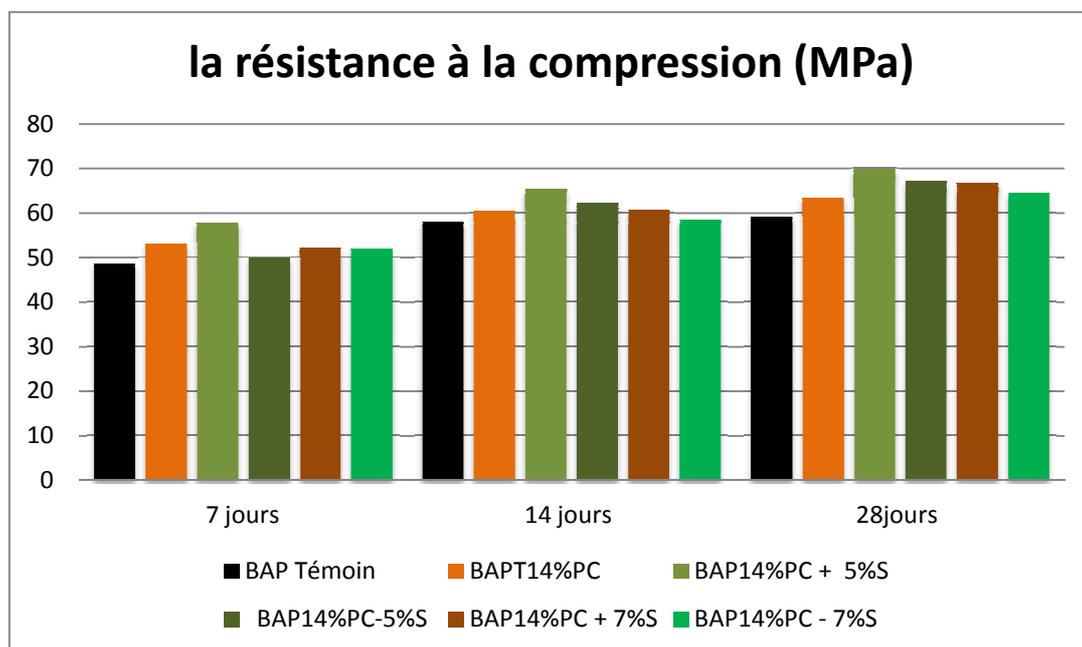


Figure IV.33 : Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton **BAP14%PC**.

Selon le Tableau IV.11 et la figure IV.27 on remarque que le béton **BAP_{7%PC+5%S}**, enregistre une résistance mécanique R_c maximale à 28 jours (**69.80MPa**) par rapport aux

autres types des bétons, et enregistre une amélioration de l'ordre de **17.98 %** comparé au témoin.

Le **BAP_{14%PC-5%S}**, donne une résistance mécanique **R_c (67.20 MPa)** plus convergente à celui

Tableau IV.12 : Caractéristiques mécaniques avec ajout 10%FC+14%PC

Type de béton	Résistance traction par flexion (MPa)
	28jours
BAP_{T14%PC}	7.14
BAP_{14%PC+ 5%S}	6.25
BAP_{14%PC -5%S}	6.57
BAP_{14%PC +7%S}	7.11
BAP_{14%PC -7%S}	6.40
BAP Témoin	6.22

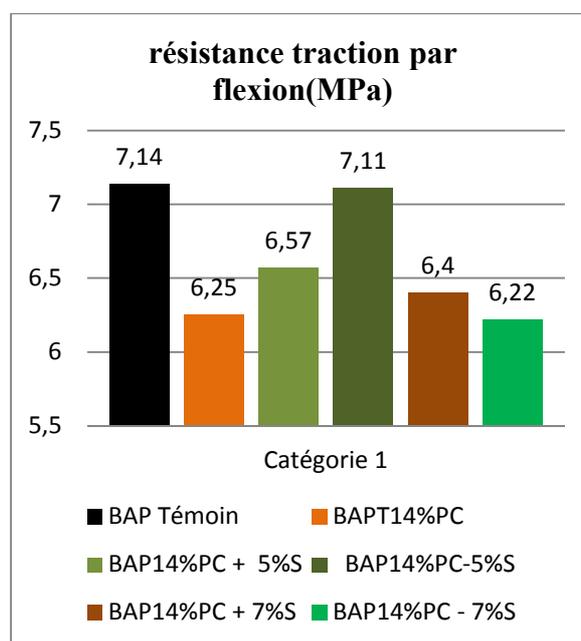


Figure IV.34 : Évolutions de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du béton BAP14%PC.

D'après les résultats de la résistance à la flexion il y'a une légère augmentation de résistance de l'ordre de **14.79 %** et **14.30%** pour la formulation qui contient **BAP_{T14%PC}** ;

$BAP_{14\%PC+7\%S}$ et de **5.62%** ; **2.89%** ; **0.48%** par ordre pour celle qui contient ($BAP_{14\%PC-5\%S}$; $BAP_{14\%PC-7\%S}$; $BAP_{14\%PC+5\%S}$).

IV.4 Essais non destructifs (END)

Les tableaux ci-après présentent les résultats des essais non destructifs (END) ultrason et scléromètre

Tableau .IV.13 Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des $BAP_{2\%pc}$ étudiés à 28 jours.

Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des $BAP_{2\%PC}$ étudiés à 28 jours.				
Type de béton	Is	R_s (MPa)	V (km /s)	R_u (MPa)
BAP Témoin	39.33	48.33	4.74	39.88
BAPT $_{2\%PC}$	40.33	50.82	4.89	46.36
BAP $_{2\%+5\%S}$	44.33	61.41	4.96	49.74
BAP $_{2\%-5\%}$	42.33	55.99	4.91	47.30
BAP $_{2\%+7}$	46.66	68.03	4.84	44.09
BAP $_{2\%-7}$	44.33	61.42	4.78	41.52

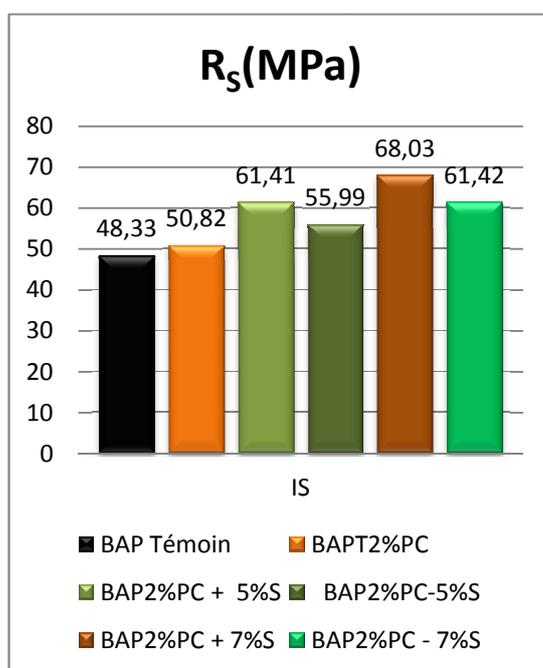


Figure I.V.35: Evaluation de la résistance avec sclérométrie pour les $BAP_{2\%PC}$

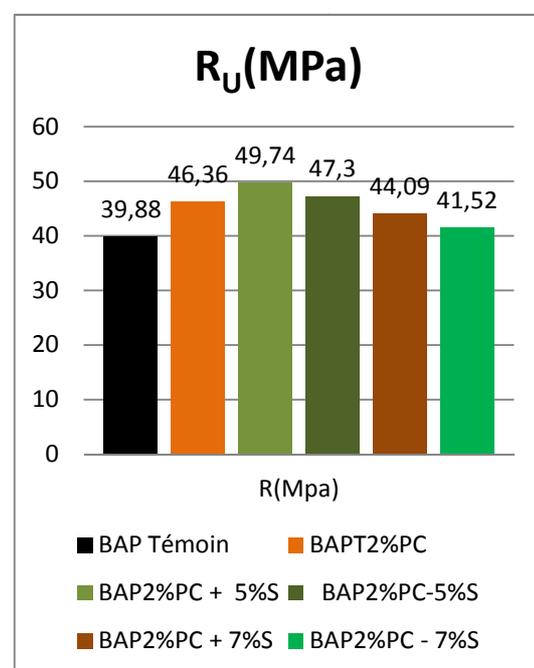


Figure IV.36: Evaluation de la résistance avec ultrason en fonction du type de $BAP_{2\%PC}$

Tableau .IV.14 Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP7%PC étudiés à 28 jours.

Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP7%PC étudiés à 28 jours.				
Type de béton	I _s	R _s (MPa)	V (km.s)	R (MPa)
BAP Témoin	39.33	48.33	4.74	39.88
BAP _T 7%PC	40.66	51.66	4.74	39.88
BAP _{7%PC+5%S}	44.33	62.68	4.78	41.52
BAP _{7%PC-5%}	44.33	62.68	4.79	41.93
BAP _{7%PC+7}	43.33	58.68	4.80	42.36
BAP _{7%PC-7}	43	57.78	4.76	40.69

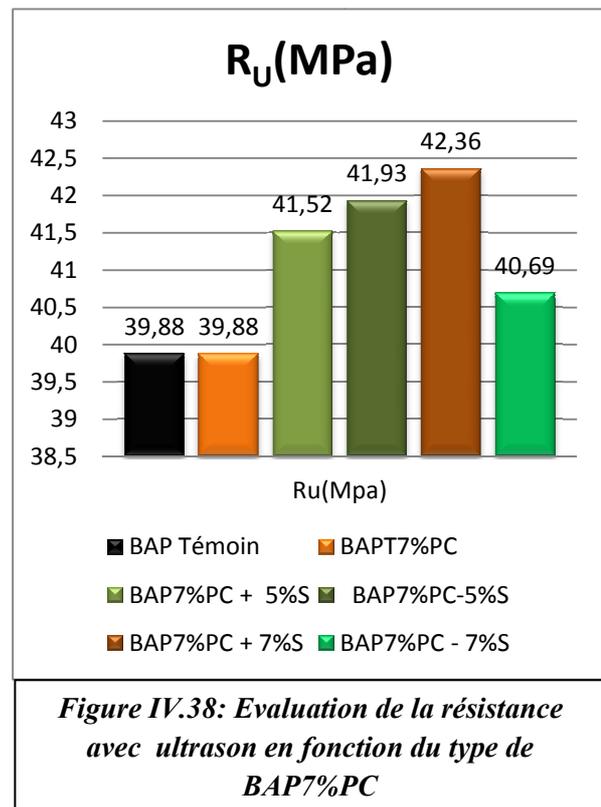
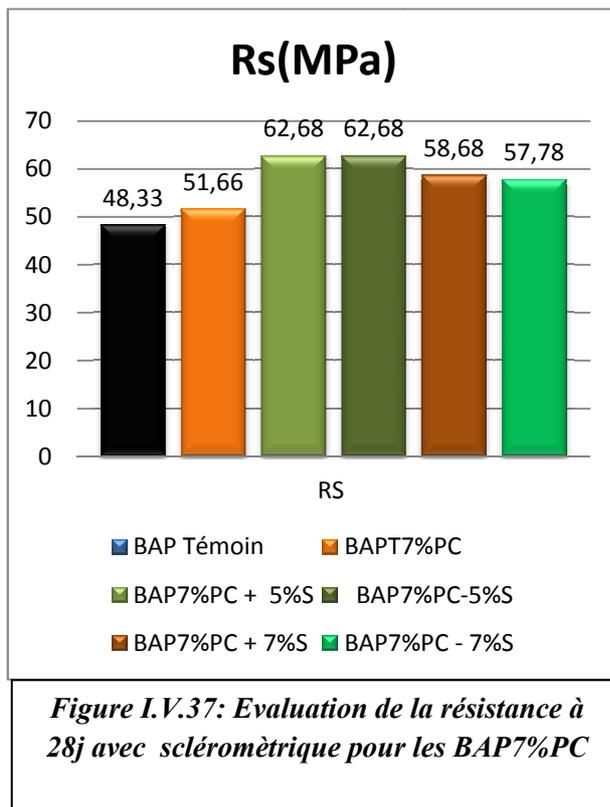


Tableau .IV.15 Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP14%PC étudiés à 28 jours.

Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP14%PC étudiés à 28 jours.				
Type de béton	I _s	R _s (MPa)	V (m/s)	R (MPa)
BAP Témoin	39.33	48.33	4.74	39.88
BAPT _{14%PC}	41	52.53	4.86	44.99
BAP _{14%+5%S}	40.33	50.82	4.96	49.74
BAP _{14%-5%S}	40.66	51.66	4.80	42.36
BAP _{14%+7%S}	40.66	51.66	4.86	44.99
BAP _{14%-7%S}	42	55.13	4.48	30.72

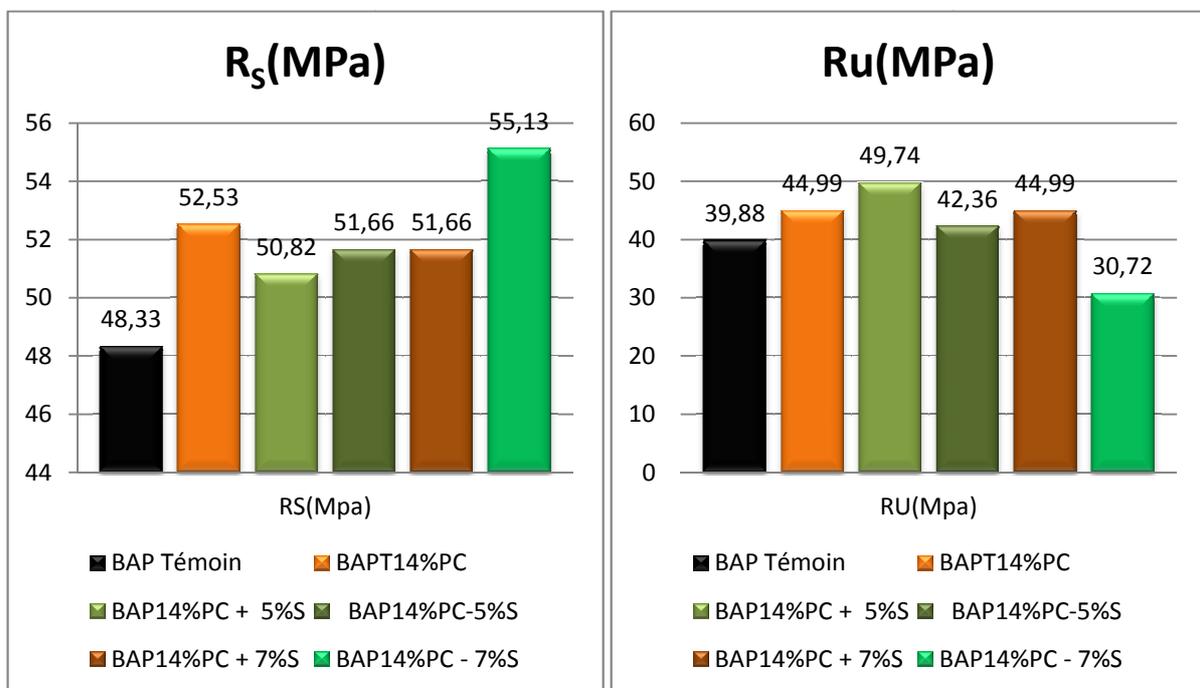


Figure I.V.39: Evaluation de la résistance à 28j avec sclérométrie pour les BAP14%PC

Figure IV.40: Evaluation de la résistance avec ultrason en fonction du type de BAP14%PC

D'après les figures et les tableaux ci-dessus, 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. La vitesse de propagation d'ultrason supérieure à 4500 m/s, la qualité de BAP excellente.

- 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.

Conclusion

Cette étude a pour objectif d'évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton autoplaçant avec l'ajout d'addition minérale (fillers de calcaire et poudre de céramique) avec différents pourcentages, afin de déterminer l'influence de la nature, et le pourcentage des additions sur les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci. et l'influence du sable fin sur la performance d'un BAP.

Pour l'influence de pourcentage de filler d'après les résultats, on observe avec l'augmentation du dosage de filler, une amélioration des propriétés rhéologiques. Les bétons autoplaçants étudiés ont donné une meilleure rhéologie : bon étalement, bonne résistance à la ségrégation, et bonne stabilité, et ont donné une réponse mécanique satisfaisante.

Conclusions générales

Notre étude s'articule sur l'optimisation de la performance des bétons autoplaçants à l'état frais comme à l'état durci. Pour achever à cet objectif, un programme expérimental, basé sur l'augmentation de teneur en additions minérales, a été conçu. Les résultats obtenus des tests sur des éprouvettes en BAP formulés en utilisant les fillers de calcaire comme ajout de base de 10% et de poudre de céramique comme ajout variable avec variation granulométrique du sable en faisant changer sa teneur en particules fines et chercher par la suite leur influences sur le comportement des béton autoplaçants confectionnés.

D'après ces résultats, on peut faire les conclusions suivantes :

Etat frais :

- ✚ Les ajouts minéraux jouent un rôle important dans l'amélioration des caractéristiques rhéologiques du béton autoplaçant (étalement, stabilité au tamis et taux de remplissage) tous les BAP testés ont donné des valeurs satisfaisantes.
- ✚ Les bétons confectionnés donnent une bonne capacité à auto placer dans les milieux non confinés est cela est vérifié par les valeurs d'étalements qui sont entre 71 à 76 cm.
- ✚ Les mêmes formules des bétons donnent des taux de remplissages acceptable dans les milieux confinés ($H2/H1 > 0.8$), c'est le cas de la boîte en L.
- ✚ Elles donnent aussi une bonne stabilité avec une bonne viscosité sans ségrégation et avec un ressuage maîtrisé ($P < 15\%$).
- ✚ On conclut que les qualités du béton frais s'améliore en fonction de volume de pâte, des pourcentages en fines calcaires et du pourcentage d'adjuvants
- ✚ L'augmentation du pourcentage de sable fin s'avère affecter les performances rhéologiques et mêmes mécaniques des BAP étudiés. Donc on a marqué une influence des particules fines du sable de dune utilisé sur la performance des BAP.
- ✚ L'augmentation de la pâte a un effet sur le seuil de cisaillement et la viscosité du béton auto plaçant mesurés par rhéomètre et qui reste dans les recommandations des normes en vigueur (ASTM C 1610).
- ✚ L'augmentation du dosage en addition entraîne une augmentation de la concentration volumique en solides, ce qui induit un accroissement des propriétés rhéologiques telles que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique quelle que soit le pourcentage de l'addition.

Etat durci :

- ✚ L'utilisation de poudre céramique et filler de calcaire avec plus de 5% sable fine par rapport à sa granulométrie dans les formulations de bétons peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique. Le **BAP_{2%PC+5%S}** donne la meilleure réponse mécanique comparé aux autres types et au témoin.

Pour compléter cette recherche, nous suggérons des recommandations perspectives qui permettront d'ouvrir les portes sur d'autres recherches plus approfondies concernent certains aspects technique des bétons autoplaçant :

Il serait intéressant de continuer la même étude vis-à-vis la résistance mécanique à long terme, et de conduire des études de valorisation sur des matériaux locaux (ajout, ciment, adjuvants..) d'une part, études de valorisation des déchets qui menacent l'environnement comme le plastique d'autre part.

Afin de mieux comprendre les différentes facettes de comportement de ce nouveau type de béton, il serait intéressant d'étudier d'autres propriétés à l'état durci : durabilité dans des milieux chimiquement agressifs, autres comportements mécanique tels que la résistance à la fatigue, le retrait, résistance au gel/dégel.

- [1] **MASSAOUIDI Farih** <<influence des agents de viscosité sur les paramètres rhéologique intrinsèque des mortiers des bétons autoplaçant thèse <<thèse Doctorat 3^{ème} cycle 2016 >>
- [2] **OKAMURA H, OUCHI M.**, “Self-compacting concrete. Development present use and future”, First International RILEM symposium on self-compacting concrete. Rilem Publication S.A.R.L., 3-14, 1999.
- [3] **Mme Ben akili sarah**, «caractérisation expérimental des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction », thèse de magister 2009.
- [4] **Mokeddem. S**, Contrôle de la rhéologie d'un béton et de son évolution lors du malaxage par des mesures en ligne à l'aide de la sonde Viscoprobe, thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2012.
- [5] **Association Française de Génie Civil**, « Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires », Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.
- [6] **Okamura, H. et Ouchi, M.** Self-compacting Concrete, Journal of advanced concrete technology, vol.1, p5-15. 2003.
- [7] **Association française de Génie Civil**, Recommandations provisoires pour l’emploi des Bétons Autoplaçants, Paris, 2ème édition, AFGC, 64 p. 2008.
- [8] **PC. Aitcin, S. Jiang, BG. Kim, PC. Nkinamubanzi, and N. Pétrov.** L'interaction ciment : superplastifiant. cas des polysulfonates. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol. 233 :87-98, Juillet-Aout 2002.
- [9] **Hanaa Fares.** Thèse de doctorat en Génie Civil «Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée», Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise, le 07 Décembre 2009.
- [10] **Turcry P.**, Thèse de doctorat en Génie Civil, « Retrait et fissuration des bétons Influence de la formulation », Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004,
- [11] **Yahia et al.**, Effect of rheological parameters on self compactability of concrete containing various mineral admixtures, 1999, Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, Stockholm, pp 523-536.
- [12] **Carlsward et al.**, Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 143-153.

- [13] **de Larrard**, Structures granulaires et formulation des bétons, Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 34.avril, 2000.
- [14] **Sandrine BETHMONT**, mecanismes de segregation dans les betons autoplaçants (BAP), thèse de doctorat, de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.
- [15] **Jin**, Properties of mortar for self-compacting concrete, PhD thesis de l'Université de Londres, 2002, 398 pages.
- [16] **Joumana Y**, Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques, thèse de doctorat, cachan, 2007
- [17] **NEHDI M**, "Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials", Cement and Concrete Research, Vol 30 pp 1603-1669, june 2000
- [18] **Yahia, A., Tanimura, M. et Shimoyama, Y.** Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, Cement and Concrete Research, vol.35, n° 3, p.532-539. (2005).
- [19] **El hilali A, E.ghorbel E, Gonnon P**, "Influence des fillers sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants", Université de Cergy-Pontoise, France, 2005.
- [20] **El hilali A, E.ghorbel E, Gonnon P**, "Influence des fillers sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants", Université de Cergy-Pontoise, France, 2005.
- [21] <http://www.cvm.qc.ca/geoffrio/index/materiau/cours11/cours11.html>.
- [22] **Association Française de Génie Civil «AFGC»**, Bétons autoplaçants – Recommandations provisoires, Juillet 2002, 63 pages.
- [23] **Josserand L**, Thèse de doctorat en Structures et Matériau, «Ressuage des bétons hydrauliques », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le 11 octobre 2002.
- [24] **NF P 18-406** relative aux essais de compression des bétons.
- [25] **BENCHERAI Saïd, 2007** « Étude des techniques de renforcement des structures en béton arme contreventées par portiques auto stables »Mémoire de Master, Université Abd-Errahmane MIRA de Béjaia.
- [26] **CHEKROUN Mathieu, 2008** «Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface»Thèse de Doctorat,École Centrale de Nantes.
- [27] **C.N.E.R.I.B, 2004** « Cycle de formation 2004.
- [28] **J.S. Popovics, *sino dato*** « Determination of elastic constants of a concrete specimen using transient elastic waves» Thèse de Doctorat, sino loco.
- [29] **Auscultation sonique**: Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton »P18-418 ,1989.

- [30] **BOUDINA Ridha et LOURADI AbdElouahab**, 2012 «Proposition d'un modèle de corrélation entre les essais non destructifs et les essais d'écrasement d'un béton fabriqué dans les conditions locales. »Mémoire de Master,Centre Universitaire de Bordj Bou Arreridj.
- [31] **F.Gabrysak, sino dato** « Les bétons : Chapitre 04 », Ecole polytechnique fédérale de LAUSANE, institut des matériaux.
- [32] **BREYSSE.D et ABRAHAM.O,2005** « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en bétons » Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [33] En ligne
- [34] **R. B. Hamouda**, *notions de macanique des fluides*, centre de bublication universitaire
- [35] **F.DeLarrard.**, Rhéologie du béton frais remanié, BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES, 1998.
- [36] **F.DeLarrard.**, *Rhéologie du béton frais remanié*, BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES, 1998.
- [37] **G. Conrrazé et Grossiord.J.L**, *Initiation à la rhéologie*, 3ème édition, 2000.
- [38] **Evans.**, **Letter of the editor** : on the nature of the yield stress, 1992
- [39]**CRÉPAULT et ÉTIENNE**, RHÉOLOGIE DES BÉTONS FRAIS À BASE DE CIMENT D'ALUMINATES DE CALCIUM, QUÉBEC: Faculté des études supérieures et post doctorales de l'Université Laval, 2012.
- [40] **Papo.A**, Rhéological models for cement pastes, 1998.
- [41] **Amziane, P. E. Koehler, W. David, Fowler, F. Chiara, Ferrari et Sofiane**, Development of a Portable Rheometer for Fresh Self-Consolidating Concrete, American Concrete Institute, 2005.
- [42] **Tattersall.G.H**, *Rheol.cement/&concret*, liverpol,1990 et Banfill, 1983
- [43] **D. Laquerbe**, Exploitation rhéométrique du test d'ecrasement entre plateaux paralleles, vol. 6, 1987
- [44] **Koehler Eric P., Fowler David W. (2004)**: Development of a portable rheometers for fresh portland cement concrete. International Center for Aggregates Research. The university of Texas at Austin. ICAR report 105-35, Measuring the workability of high fines concrete, 306 pages
- [42] **Cyr.M**, Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires, 1999
- [44] **Mansoutre.S**, Des suspensions concentrées aux milieux granulaires lubrifiés, Etude des pâtes de silicate tricalcique, 2000
- [45] **Chidiac S.F., Maadani O., Razaqpur A.G., Mailraganam N.P. (2000)**: Controlling the quality of fresh concrete – a new approach. Mag. Concrete Research, 52 , 353 – 363.

- [46] **Wallevik Olafur Haraldsson, Wallevik Jon Elvar (2011)** : Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research* 41; 1279 – 1288et **Wallevik J. (2006)**: Relationship between the Bingham parameters and slump. *Cement and Concrete Research*. Vol 36 (7), 1214 – 1221.
- [47] **Wallevik O.H. (1990)**: The rheology of fresh concrete and its application on concrete with and without silica fume. PhD Thesis, NTH, Trondheim.
- [48] **Khayat K.H. (1998)**: Viscosity enhancing admixtures for cement based materials: an overview. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 20, 171 -188.
- [49] **De Schutter G. (2011)**: Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete. 36th conference on our world in concrete and structures. Singapore: 14 – 16 August
- [50] **Bonavetti V.L., Rahhal V.F., Irassar E.F. (2001)**: Studies on the carboaluminate formation in limestone filler – blended cements. *Cement and Concrete Research*. 31 (6) 853 – 859.
- [51] **L E Hai – Dang (2014)** : Etude de l'effet de la couche limite sur les profils de vitesse du béton pompé. Thèse de doctorat, Université de Cergy pontoise, France, 231 pages. 144. **LE Vinh-An (2014)**: Comportement des bétons autoplaçants par temps chaud. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, France, 177 pages.
- [52] **Ghomari F., Boukli Hacène S.M.A., Taleb O. (2011)**: Study of Limestone Addition on the Mechanical and Rheological Characteristics in the SCC. *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 5, No 3, pp. 412 – 423.
- [53] **Ghezal A., Khayat K.H. (2002)**: Optimizing self consolidating concrete with limestone filler by using statistical factorial design methods, *ACI Materials Journal*, N°99 – M27, May – June.
- [54] **Adjoudj M'hamed (2015)** : Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton. Thèse de doctorat. Université de Chlef, Algérie, 162 pages.
- [55] **Wen-Qiang Zuo, Wen Xu, QianTian, Qian-qian Zhang, Peng-gang Wang, Wei Li (2016)**: Design and properties of low binder self compacting concrete. In *SCC2016, 8th international RILEM Symposium on self compacting concrete “Flowing toward sustainability”* Edited by KHAYAT K.H., Washington, USA, 15 – 18 May, pp. 131 - 141.
- [56] **Corinaldesi V., Moriconi G. (2011)**: The role of industrial by – products in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 25, 3181 – 3186.
- [57] **El Hilali Abdellah (2009)** : Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : influence des fines calcaires et des fibres végétales. Thèse de Doctorat. Université de Cergy Pontoise, France, 183 pages. 65.
- [58] **Esping O. (2008)**: Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 38, 938 – 944. 69.
- [59] **Nehdi M. (2000)** : Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials. *Cement and Concrete Research* 30, 1663-1669.

- [60] **Michel F., Pierard J., Courard L., Pollet V. (2007)**: Influence of physic-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances. Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC, 3 - 5 September, Ghent, Belgium, pp. 205-210.
- [61] **Diederich Paco (2010)** : Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, France, 253 pages.
- [62] **Haddadou Naïma (2015)** : Elaboration et caractérisation de béton autoplaçants fibré avec ajout de poudre de marbre. Thèse de doctorat. Université de Boumerdès, Algérie, 179 pages.
- [63] **Mucteba Uysal, Kemalettin Yilmaz (2011)** : Effect of mineral admixtures on properties of self compacting concrete. Cement and Concrete Composites 33, 771 - 776.
- [64] **Hwang Chao – Lung, Tsai Chih – Ta (2005)**: The effect of aggregate packing types on engineering properties of self consolidating concrete. First international symposium on design, performance and use of self consolidating concrete, SCC 2005. China, 26 – 28 May, pp. 337 - 346.
- [65] **Estellé P., Lanos C., Perrot A. (2008 (c))**: Processing the vane shear flow data from couette analogy. Applied Rheology, Vol 18 : 3, 34 – 37
- [66] **Heirman G., Vandewalle L., Van Gemert D., Wallevik O. (2008)**: Integration approach of the coquette inverse problem of powder type self compacting concrete in a wide gap concentric cylinder rheometers. Journal of Non Newtonian Fluid Mech., 150, 93 – 103.
- [67] **TALEB Omar** ; Etude du comportement rhéologique des bétons autoplaçant ; 2017.

Résumé

Les additions minérales et les adjuvants influencent le comportement rhéologique des bétons autoplaçant (BAP) à l'état frais, mais aussi pour participer aux propriétés mécaniques, notamment dans le cas d'ajouts actifs.

Dans cette étude, un programme d'essais a été effectué sur des bétons auto plaçant composés de ciment et d'ajouts ménagers, filler de calcaire et poudre de céramique comme addition minérale. Les résultats obtenus montrent un effet avantageux de ces additions combinées à un dosage de pâte élevé avec une variabilité granulométrique du sable en faisant changer sa teneur en particules fines quant à l'amélioration des propriétés rhéologique et physico-mécaniques des bétons autoplaçants étudiés.

La série d'essais a été réalisée à l'aide des méthodes basées sur des essais d'ouvrabilité (étalement, boîte en L et essais de stabilité aux tamis) pour déterminer les paramètres rhéologiques, ainsi que le seuil de cisaillement et la viscosité à l'aide du rhéomètre à l'état frais. Une caractérisation mécanique a eu lieu aux moyens des méthodes directes (écrasement) et non destructifs (ultrason et scléromètre) pour l'évaluation de la réponse mécanique à l'état durci.

Mots clés : seuil de cisaillement, paramètres, rhéologiques, la viscosité, béton autoplaçant, sable.

Abstract

The mineral addition and adjuvant govern the rheological behavior of self compacting concrete to these mineral addition are introduced in to the concrete to improve their rheological behavior in the fresh state, but also to participate in the mechanical properties especially in the case of active addition.

In the study, a test program was performed on self-placing concretes composed of cement and household addition, limestone and ceramic powder is mineral addition. The results obtained show mineral advantages effect of these combined addition to a high paste dosage with granulometric variability of the send by changing its content of fines particles as to improvement of the rheological and physic-mechanical properties of the self compacting concert studied.

The series of tests was perfumed using methods based on workability tests (Flow table, L-box and sieve stability tests) to determine the rheological parameters, as well as the shear threshold and the viscosity using the remoter in the fresh state. Mechanical characterization was performed by means of the direct (crush) and non-destructive methods (ultrasonic velocity and rebound hammer) of the mechanical response in the hardened state.

Key words: shear threshold, parameter, rheological, the viscosity, self-compacting concrete, sound

ملخص

وتحكم الاضافات المعدنية و المواد المساعدة السلوك الريولوجي للخرسانة الذاتية يتم ادخال هذه الاضافات المعدنية في الخرسانة لتحسين سلوكها الريولوجي في الحالة منعشة ولكن ايضا للمشاركة في الخواص الميكانيكية خاصة في حالة الاضافات النشطة. في هذه الدراسة , تم تنفيذ برنامج اختبارات علي الخرسانة الذاتية المكونة من الاسمنت و الاضافات المنزلية حشو الكلس ومسحوق السيراميك كإضافة معدنية تظهر النتائج وجود تأثير ايجابي لهذه الاضافات المدمجة لجروعات معجون عالية مع تغير حجم جسيمات الرمل من خلال تغير محتواه من الجسيمات الدقيقة فيما يتعلق بتحسين الخصائص الريولوجية والفيزيائية الميكانيكية للخرسانة الذاتية المدروسة.

تم إجراء سلسلة من الاختبارات باستخدام طرق تعتمد علي اختبارات قابلية العمل (الانتشار علبة ل واختبارات ثبات للغرايل) لتحديد الاعدادات الريولوجية وكذلك عتبة القص والزوجة باستخدام مقياس الضغط في الحالة الجديدة. تم التوصيف الميكانيكي بواسطة الطرق المباشرة (السحق) وغير المهدمة (الموجات فوق الصوتية ومقياس الصلابة) لتقييم الاستجابة الميكانيكية في الحالة المتصلبة. **الكلمات الرئيسية:** عتبة القص, اعدادات , الريولوجية , الزوجة , الخرسانة الذاتية , الرمل