

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'étude

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux En Génie Civil

Thème :

**INFLUENCE DES ADDITIONS MINIRALES ET LE SABLE
FIN SUR LE COMPORTEMENT DU <<BAP>> A L'ETAT
FRAIS ET DURCI**

Présenté par : BOUKHARI DALLEL

Encadreuse:

Mme. ROUBAH Souad

Soutenu le : 03-07-2018

Devant le jury :

Président : ACHOUR Yacine

MCA Université de BBA

Examineur : NOUI Ammar

MCA Université de BBA

Examineur : LOUMACHI Lazhar

MAA Université de BBA

Année Universitaire : 2017/2018.

Remerciements

Je remercie tout premièrement Dieu, le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donnée durant toutes ces Longues années.

En second lieu, J'exprime toute ma reconnaissance à ma encadreuse de mémoire madame **.TABET Souad** ; Je la Remercie de m'avoir encadrée, orientée, aidée et conseillée, par ailleurs, mes remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.

Mes remerciements vont aussi au chef de département de génie civil et à tous les enseignants de département sans oublier les responsables de notre labo ainsi que le personnel du labo de la cimenterie d'Ain Lkbira à Sétif pour leur accueil et aide.

En fin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous mes amis et collègues.

Dédicaces

A ceux qui se sont toujours dévoués et sacrifiés pour moi ; ceux qui m'ont encouragée et soutenue à combattre les aléas de la vie et donner le meilleur de moi ; en témoignage de mon éternelle reconnaissance je dédie essentiellement ce mémoire à **mes parents**.

A mon cher frère ainsi qu'à **mes chères sœurs** ; qui m'ont énormément aidée et à qui je témoigne toute mon affection et ma profonde admiration.

Je finis par remercier toute personne qui m'a aidée et soutenue, de près ou de loin, pour que ce modeste mémoire aboutisse à sa fin.

Résumé

Le volume de la pâte est un facteur très important vis-à-vis la performance d'un béton auto plaçant à l'état durci et, plus spécifiquement, à l'état frais où il faut assurer une bonne fluidité sans ségrégation, cela se traduit par un seuil de cisaillement et une viscosité plastique associée faible. La non ségrégation peut être contrôlée par un agent de viscosité ou un important volume de fines, qui jouent un rôle de remplissage, un rôle rhéologique par leur rôle fluidifiant et un rôle chimique et physique en augmentant la résistance et en améliorant la durabilité. Pour cela, on utilise, comme additions minérales, des fines calcaires dans la formulation de base en lui ajoutant la poudre de céramique en différents pourcentage (donc faire varier le volume de pâte) et en faisant varier le pourcentage des particules fines constituants le sable utilisé qui est combiné de sable concassé et de sable de dune.

Mots clés : Béton auto plaçant, seuil de cisaillement, rhéologie, viscosité, additions minérales.

ملخص

ان حجم عجينة الاسمنت هو عامل مهم جدا فيما يتعلق بأداء الخرسانة ذاتية التشكيل في الحالة الرخوة وفي الحالة الصلبة، والأكثر أهمية هو ضمان السيولان الجيد للخرسانة دون تعرضها لفصل مكوناتها وتراكم الحبيبات الكبيرة الحجم ولا يتوفر هذا الا من خلال قيمة منخفضة لعتبة القص واللزوجة البلاستيكية المرافقة. يمكن التحكم في عدم التراكم بواسطة عامل لزوجة أو كمية كبيرة من الحبيبات الناعمة، والتي تلعب دور الملء، ودور انسيابي لدورها المائع ودورها الكيميائي والميكانيكي من خلال زيادة القوة وتحسين المتانة. ولتحقيق ذلك، فإننا استخدمنا في هذه الدراسة، كإضافات معدنية، غرامات من الحجر الجيري في الصياغة الأساسية و بإضافة مسحوق السيراميك بنسب مختلفة وبتغيير النسبة المئوية للجسيمات الدقيقة التي تشكل الرمل المستخدم مع الرمل المسحوق ورمل الكثبان و من ثم دراسة تأثيرها على ما سبق ذكره.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية التشكيل ، عتبة القص ، الريولوجيا ، اللزوجة ، الإضافات المعدنية.

Summary

The volume of the paste is a very important factor with regard to the performance of a self-placing concrete in the fresh state and in the hardened state, and the most important is to ensure a good fluidity without segregation this results in a shear threshold and a low plastic viscosity. The non-segregation can be controlled by a viscosity agent or a large volume of fines, which play a role of filling, a rheological role by their fluidifying role and a chemical and physical role by increasing the strength and improving durability. For this, we use as mineral additives, limestone fines in the base formulation by adding the ceramic powder in different percentages (thus to vary the volume of dough) and by varying the percentage of fine particles constituting the sand used which is combined with crushed sand and dune sand.

Key words: Self - placing concrete, shear threshold, rheology, viscosity, mineral additions.

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : REVUE GENERALE SUR LES BAP	
I.1. Introduction.....	3
I.2 .Définition du béton auto plaçant.....	3
I. 3. Historique des bétons auto plaçants.....	4
I. 4 .Domaine d'utilisation des BAP.....	5
I .5.les avantages et inconvénients des BAP.....	5
I.6.composition spécifique des BAP.....	6
I.7. Les constituants du BAP.....	7
I.7.1Le ciment.....	8
I .7.2Les différents types de ciment.....	8
I.7.3Les additions minérales.....	9
I.7.4 Les granulats.....	9
I.7.5 l'eau.....	10
I.7. 6 le super plastifiant.....	10
I.7.7 les adjuvants.....	12
I.8.les fillers calcaires.....	12
I.8. 1 Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des BAP.....	12
I.9. Les différentes approches de formulation.....	13
I.9.1 Méthode de formulation pratique des BAP.....	13
I.9.2 Formulations des BAP existants dans la bibliographie.....	13
I.9.2.1 Approche japonaise.....	13
I.9.2.2 ApprocheCBI (suédoise).....	14
I.9.2.3 Approche LCPC.....	15
I.10 caractérisation d'un béton auto plaçant.....	15
I.10.1propriétés des BAp à l'état frais.....	15
I.10.2 le remplissage.....	15
I.10.3 la résistance à la ségrégation.....	16
I.10.4 la capacité de passage.....	16
I.11. caractérisation des BAP à l'état frais.....	16
I.11.1 Essai de l'étalement (Essai au cône d'Abrams).....	17
I.11.2 Ségrégation dynamique (Essai de la boîte en L).....	18
I.11.3 Essais de ségrégation statique (Essai de la stabilité au tamis).....	19

I.11.4 Ressuage.....	20
I.12 Caractérisation d'un béton auto plaçant à l'état durci.....	21
A) Essais destructifs du béton.....	21
I.12.1 Les essais de compression.....	21
I.12.2 Les essais de traction par flexion.....	22
B) Essais non destructifs du béton.....	23
I.13 Conclusion.....	24

CHAPITRE II : RHEOLOGIE ET RHEOMETRIE DES BAP

II.1 Introduction.....	25
II.1.1 Contrainte de cisaillement.....	25
II.1.2 Vitesse de cisaillement.....	26
II.1.3 Seuil de cisaillement.....	27
II.1.4 Viscosité.....	27
a) Viscosité dynamique μ	28
b) Viscosité cinématique ϑ	29
II.2 Fluide newtonien.....	29
II.3 Lois de comportement rhéologique.....	29
II.4 Appareils de mesures de rhéologie.....	30
II.4.1 Rhéomètres agitateurs-malaxeurs.....	30
II.4.2 Rhéomètres à cylindres coaxiaux.....	32
II.4.3 Rhéomètre plan-plan.....	33
II.4.4 Rhéomètre ICAR.....	33
II.5 Comportement rhéologique du béton frais.....	34
II.6 Rhéologie des bétons auto plaçants.....	34
II.7 Influence des paramètres de formulation.....	35
II.7.1 Eau et air.....	35
II.7.2 Super plastifiants.....	35
II.7.3 fillers calcaires.....	35
II.7.4 Granulats.....	38
II.8 Conclusion.....	38

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

III.1 Introduction.....	40
III.2 Matériaux utilisés.....	40
III.3 Caractéristiques du sable utilisé.....	40
III.3.1 Essai d'analyse granulométrique : [NF EN P18-650].....	40
III.3.2 Module de finesse : [NF EN P 18-304].....	43
III.3.3 Equivalent de sable [NF EN 18-598].....	43
A. Equivalent de sable visuel : (E.S.V).....	44
B. Equivalent de sable piston : (E.S.P).....	45
III.3.4 Masse spécifique (absolue) : [NF EN P 18-555].....	46
A. Sable de dune.....	46
B. Sable concassée.....	47
III.3.4 Masse volumique apparente : [NF EN P 18-555].....	47
A) Sable de dune.....	47
B) Sable concassée.....	48
III.3.5 Porosité et compacité et indice des vides : [NF EN P- 554].....	48
III.4 Caractéristiques du gravier utilisé.....	48
III.4.1 Origine du gravier utilisé.....	48
III.4.2 Analyse granulométrique.....	48
III.4.3 Masse volumique apparente : [NF EN P18-554].....	50
III.4.4 Masse volumique absolue.....	51
III.4.5 Compacité, porosité et l'indice de vide : [NF EN P 18-554].....	52
III.4.6 Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés.....	52
III.4.7 Essai Los Angeles [NF EN P18-573].....	52
III.5 CIMENT.....	54
III.5.1 Caractéristiques du ciment CEM II/B 42,5.....	54
III.5.2 Caractéristiques physiques du ciment utilisé EN 196-1, (2002).....	54
III.5.3 Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé.....	55
III.6 Les Fillers de calcaire.....	55
III.6.1 Caractéristiques physiques.....	55
III.6.2 Caractéristiques chimiques.....	56
III.7 Poudre de céramique blanche.....	56
III.7.1 Caractéristiques physiques.....	57

III .7.2 Caractéristiques chimiques.....	57
III.8Les Adjuvants.....	57
III.8.1 Propriétés.....	58
III.9 L'eau de gâchage : [EN 1008].....	58
III.10Formulation du béton auto plaçant par la méthode LCPC.....	59
III.10.1Méthode française LCPC).....	59
III.10.2 Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC.....	59
III.11Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais.....	63
III.11.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams [NF EN 12 350-8].....	64
III.11. 2 Essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11].....	65
III.11.3 Essai de la boîte en [L NF EN 12 350-10].....	67
III.12 Essai Rhéomètre.....	67
III.13Confection des éprouvettes.....	68
III.13.1 Type et tailles des moules.....	68
III.13.2Conservation des éprouvettes.....	68
III.14 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci	69
III.14.1Essai compression [NF EN206-1].....	69
III.14.2Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NA 125042]	69
III.14.3Ultrason [NA EN 12504-4].....	70
III .5Conclusion.....	70

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1Introduction.....	71
IV.2Différents BAP préparés et leur symboles.....	71
IV.3Présentation de résultats.....	72
IV.3.1Les résultats à l'état frais.....	72
IV.3.2Valeurs rhéométriques de ingham.....	74
IV.4 Les résultats à l'état durci.....	78
IV.4 .1 La résistance à la compression.....	78
IV.4.2 Les résultats d'ultrasons et scléromètre.....	82
IV.5 Conclusion.....	85
CONCLUSION GENERALE.....	86

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : REVUE GENERALE SUR LES BAP

Tableau I.1 Propriétés d'ouvrabilité des BAP.....	17
---	----

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Tableau III. 1 Analyse granulométrique du sable composé.....	42
Tableau III.2 classification des sables en fonction de module de finesse.....	43
Tableau III. 3: Équivalent de sable.....	45
Tableau III.4: La classification de la nature sable en fonction d'ES	46
Tableau III.5 : La masse absolue de sable de dune.....	46
Tableau III.6 : La masse absolue de sable concassée.....	47
Tableau III.7: La masse volumique apparente à l'état lâche.....	47
Tableau III.8: La masse volumique apparente à l'état lâche.....	48
Tableau III.9 : Porosité, compacité et indice des vides.....	48
Tableau III.10 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	49
Tableau III.11 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.....	49
Tableau III.12 : Masse volumique apparente du gravier.....	51
Tableau III.13 : La masse volumique absolue du gravier.....	51
Tableau III.14 : Porosité, compacité et l'indice des vides.....	52
Tableau III.15 : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	53
Tableau III.16 : Classification des roches en fonction du coefficient LA.....	54
Tableau III 17: Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5.....	54
Tableau III.18 Les composition chimique du CEM II/B 42.5.....	55
Tableau III.19 Les composition minéralogique du ciment CEM II/B 42.5.....	55
Tableau III.20: La composition chimique de filler calcaire.....	56
Tableau III.21: La composition chimique de céramique.....	57
Tableau III.22: Caractéristique de l'adjuvant« MEDAFLOW 30 ».....	58
Tableau III.23 : Propriétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci.....	58
Tableau III.24: Analyse chimique de l'eau utilisée.....	58
Tableau III.25 composition d'un mètre cube de BAP formulé par la méthode LCPC.....	61
Tableau III.26composition d'un mètre cube de BAP 2% Céramique.....	61
Tableau III.27 Composition de béton témoin pour confection 36 l.....	62

Tableau III.28 Composition des différents bétons pour confection 36 l en Kg.....	62
--	----

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Tableau. IV.0 les mélanges préparées avec avec leurs symboles.....	71
Tableau .IV.1 Caractéristiques rhéologiques des BAP préparés.....	72
Tableau. IV.2 caractéristique rhéologiques des différents BAP mesurées par rhéomètre.....	77
Tableau. IV.3 la résistance à la compression des mélanges à base de 2% céramique.....	79
Tableau. IV.4la résistance à la compression de BAP à base de 7% céramique.....	80
Tableau. IV.5la résistance à la compression de BAP à base de 14% céramique.....	81
Tableau. IV.6 Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) desBAP2%PC étudiés à 28 jours.....	82
Tableau .IV.7 Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is). des BAP7%PC étudiés à 28 jours.....	83
Tableau .IV.8 Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) desBAP14%PC étudiés à 28 jours.....	84

Liste des figures

CHAPITRE I : REVUE GENERALE SUR LES BAP

Figure I.1 Le pont Akashi Kaikyo	4
Figure I.2 Constituants des bétons Ordinaires et des BAP.....	7
Figure I.3 Les actions des super plastifiants	11
Figure I.4 Pate de ciment non adjuvantée	11
Figure I.5 Pate de ciment additionnée d'un super plastifiant	11
Figure I.6 Essai d'étalement.....	18
Figure I.7 boîte en L.....	19
Figure I. 8 Essai de la stabilité au tamis.....	20
Figure I.9 Essai de ressuage à l'aéromètre.....	21
Figure I.10 -Mesure de la résistance à la compression.....	22
Figure I.11 Mesure de la résistance à la traction par flexion.....	22

CHAPITRE II : RHEOLOGIE ET RHEOMETRIE DES BAP

Figure II.1 Schéma de la contrainte de cisaillement.....	25
Figure II.2 Schéma de vitesse de cisaillement.....	26
Figure II.3 Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton.....	27
Figure II.4 Schéma de glissement des couches.....	28
Figure II.5. Glissement des couches.....	28
Figure II.6 Les types de comportement rhéologique.....	30
Figure II.7 Rhéomètre Two-point-test.....	31
Figure II.8 Rhéomètre à béton IBB.....	31
Figure II.9 Rhéomètre BML.....	32
Figure II.10 Rhéomètre à béton du Cemagref.....	32
Figure II.11 Rhéomètre à béton BT Rhéom.....	33
Figure II.12 rhéomètre ICAR.....	34
Figure II.13 Rhéogramme illustrant l'influence de SP sur les propriétés rhéologiques des bétons [Wallevik, 1983].....	35
Figure II.14 : Diagramme de contours de l'étalement a T0 et de la perte de fluidité à T45 pour des mélanges avec fillers calcaires et super plastifiants (E/L = 0,55) Ciment = 290 Kg/m ³ ; (b) Ciment = 360 Kg/m ³ (Ghezal et al. 2002)	36

Figure II.15 Etalement et T500 des BAP avec fillers calcaires (LP), poudres de basalte (BP) et poudres de marbre (MP) (Mucteba et al.2011)	38
--	----

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Figure III.1 Courbe granulométrique du sable composé.....	42
Figure III.2 Essais d'équivalent de sable.....	44
Figure III.3 Essai équivalent de sable exécutés au laboratoire.....	44
Figure III.4 Essai équivalent de sable exécutés au laboratoire.....	45
Figure III.5 Courbe granulométrique du gravier 3/8.....	49
Figure III.6 Courbe granulométrique du gravier 8/16.....	50
Figure III.7: Appareil de l'essai Los Angeles.....	53
Figure III.8 fillers de calcaire.....	55
Figure III.9: Poudre de céramique blanche.....	56
Figure III 10 Essai d'étalement.....	65
Figure III. 11- Stabilité au tamis.....	66
Figure III.12 : Essai capacité de remplissage.....	67
Figure III.13 : Essais rhéomètre.....	68
Figure III.14 Conservation des éprouvettes.....	68
Figure III.15 Essai compression.....	69
Figure III.16 : Principe de l'essai scléromètre.....	69
Figure III.17. Appareil ultrason.....	70

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Figure IV.1 L'étalement, stabilité de tamis et l'essai de boîte en L en fonction de type de béton.....	73
Figure IV.2 Courbe d'écoulement des points de BAP _{T1}	74
Figure IV.3 Courbe d'écoulement des points de BAP _{T2}	74
Figure IV.4 Courbe d'écoulement des points de BAP _{5S}	74
Figure IV.5 Courbe d'écoulement des points de BAP.....	74
Figure IV.6 Courbe d'écoulement des points de BAP _{7S}	75
Figure IV.7 Courbe d'écoulement des points de BAP _{8S}	75
Figure IV.8 Courbe d'écoulement des points de BAP _{T3}	75
Figure IV.8 Courbe d'écoulement des points de BAP _{9S}	75

Figure IV.10 Courbe d'écoulement des points de BAP _{10S}	75
Figure IV.11 Courbe d'écoulement des points de BAP _{11S}	75
Figure IV.12 Courbe d'écoulement des points de BAP _{12S}	76
Figure IV.13 Courbe d'écoulement des points de BAP _{T4}	76
Figure IV.14 Courbe d'écoulement des points de BAP _{13S}	76
Figure IV.15 Courbe d'écoulement des points de BAP _{14S}	76
Figure IV.16 Courbe d'écoulement des points de BAP _{15S}	76
Figure IV.17 Courbe d'écoulement des points de BAP _{16S}	76
Figure IV.18 .la viscosité des différents BAP.....	77
Figure IV.19. Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du BAP à base de 2% de céramique.....	79
Figure IV.20. Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du BAP à base de 7% de céramique.....	80
Figure IV.21. Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du BAP à base de 14% de céramique.....	81
Figure IV.22: Evaluation de la résistance à 28j avec essais non destructifs pour les BAP 2%PC.	83
Figure I.V.23 : Evaluation de la résistance à 28j avec essais non destructifs pour les BAP 7%PC.	84
Figure IV.24 : Evaluation de la résistance à 28j avec essais non destructifs pour les BAP14%PC.	85

Les abréviations

AFGC : Association française gène civile.

LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées

BAP : Béton auto plaçant.

SC : sable concassée

SD : sable de dune

Mf : module de finesse du sable

Sp : super plastifiant

PC : poudre de céramique

Rc : La résistance mécanique.

G : Gravaï.

S : Sable.

E : Eau.

C : Ciment.

DT : Essais destructifs .

NDT : Essais non destructifs . .

Is : indice scléromètre.

V : La vitesse du son.

INTRODUCTION GENERALE

Le béton auto plaçant a été développé au Japon en 1988, il représente l'un des plus importantes avancées dans la technologie des bétons dans les dernières décennies. Le béton auto plaçant (BAP) est un béton capable, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant de moyens de vibration afin de consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène. Ce type de béton doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées, cependant, une vitesse dépendante de la viscosité du mélange est recommandée. Pour remplir cette condition, le béton doit être très fluide, c'est-à-dire très déformable. Or ceci n'est possible que si le rapport eau/ciment est élevé ou si le béton contient un super-plastifiant. [1]

Un béton auto plaçant (BAP), doit avoir des performances acceptables en terme de rhéologie à l'état frais (bonne fluidité, facilité de coulage et sans ségrégation) ainsi qu'à l'état durci (bonne résistance mécanique).

Cette caractéristique n'est plus suffisante pour identifier les propriétés rhéologiques des bétons auto plaçants. L'utilisation de rhéomètre s'impose dans ce cas, afin d'examiner l'écoulement de ces fluides visqueux, car il permet la mesure des paramètres intrinsèques du matériau en termes de quantités physiques fondamentales.

Ce travail a pour objectif d'évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton auto plaçant constitué de différents pourcentages d'additions minérales (filler de calcaire et poudre de céramique) et en faisant changer la granulométrie du sable combiné de deux types de sables : un sable concassé et un sable de dune et ce en changeant sa teneur en particules fines.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Chapitre I : Revue générale sur le béton auto plaçant

Consiste à donner une idée générale sur l'apparition, la définition et le domaine d'application du béton auto plaçant.

Chapitre II : Consiste d'un rappel des définitions fondamentales sur la rhéologie et les rhéomètres.

Chapitre III : Matériaux, matériels et essais

Donne une idée sur les essais utilisés pour la caractérisation physiques, chimiques et mécaniques des matériaux, ainsi que sur les matériels utilisés pour ces essais.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats obtenus tout au long des différentes phases du projet sont exposés et analysés dans ce chapitre.

Le travail se termine par une conclusion générale avec perspectives qui est un résumé et une conclusion finale de ce travail de recherche.



CHAPITRE I
REVUE GENERALE SUR LES BAP

CHAPITRE I

REVUE GENERALE SUR LES BAP

I.1. Introduction

Les BAP ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était d'augmenter les cadences de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre de bétons.

Ce premier chapitre fait l'objet d'une initiation au BAP, il comporte des notions fondamentales relatives aux caractéristiques des BAP.[1]

I.2 .Définition du béton auto plaçant

Ce béton est défini comme: béton autonivelant, béton autocompactant (self compacting Concrete SCC) ou béton hyper fluide. Toute fois, l'appellation la plus connue aujourd'hui en Général est: béton autoplaçant.

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, homogènes et stables. La spécificité principale de ces bétons réside du fait qu'ils sont mis en place sans vibration. Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes de coffrages les plus complexes, grâce à leur bonne uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures très résistantes et durables. [1]

Dans certains cas, on parle de béton autonivelant (BAN) pour les dalles et les parois Horizontales et de béton autoplaçant (BAP) pour les murs et les parois verticales. Les principes de formulation de bétons autoplaçants se distinguent des bétons ordinaires par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment + fines + eau + adjuvants) plus élevé, ils sont caractérisés par une quantité de fines élevée et l'emploi d'adjuvants nommés: super plastifiants hauts réducteurs d'eau.

Une nouvelle vague d'adjuvants appelés : rétenteurs d'eau ou agents de viscosité entrant quelque fois dans leur formulation.

Ces derniers assurent la viscosité de la pâte pour lui conférer des propriétés limitant la ségrégation.

La dernière caractéristique des BAP est la faible teneur de granulats de l'ordre 20 à 25 Millimètres. Pour ce béton, on se fixe de travailler le plus possible avec des granulats de 16mm de taille maximale, voire dans la mesure du possible moins A l'état frais, les BAP se distinguent des bétons ordinaires par le fait qu'ils s'écoulent sous leur poids propre avec un débit suffisant écartant les moyens de vibration [2].

Le BAP s'écoule sans vibration dans les zones confinées ou très ferraillées, tout en gardant une fluidité élevée et une bonne résistance à la ségrégation.

I. 3. Historique des bétons auto plaçants

Ces bétons hyper fluides étaient en même temps stables et connaissaient une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage.

Pour satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique des bétons coulés sous l'eau, en effet, la première génération des bétons auto plaçants est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée. Ces bétons contiennent souvent des agents colloïdaux dans le but de résister à la ségrégation des gros granulats et aussi au phénomène de ressuage.

Construire avec cette nouvelle gamme de béton est en train de prendre de l'ampleur à travers le monde, en effet, depuis son développement, le nombre d'ouvrages réalisés avec les bétons autoplaçants est en bonne croissance notamment au Japon. Les bétons autoplaçants offrent des possibilités d'utilisation très intéressantes dans de nombreux domaines : constructions ; renforcement ainsi que la réparation d'ouvrage d'art (Application de couches minces dans des endroits difficiles d'accès); construction d'éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour canalisation (béton coulé sous l'eau pour des réparations, béton confiné, pieux...etc.).

Nous citons quelques exemples de réalisations Japonaises :

- ❖ le pont Kiba Parkou 650 m³ de bétons auto plaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 60Mpa
- ❖ le pont Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu au monde d'une portée de (3910 m)

Ou 390.000m³ de béton auto plaçant versés dans les coffrages des fondations et des piliers (OKAMURA et Coll.1994). [3]

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



- ❖ Landmark Tower où un béton auto plaçant de déformabilité remarquable a été mis en place dans 66 colonnes de 40m de hauteur chacune (HAYAKAWA et Coll.1995) [4];
- ❖ le stade de Fukaka ou 10.000 m³ de béton auto plaçant ont été utilisés pour des sections très ferrillées de forme complexe (IZUMI et Coll.1995) [5]

Nous notons d'autre part que diverses structures (réservoirs, murs de soutènement, poteaux....etc.) ont été construites en totalité ou en partie avec des bétons auto plaçants

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

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de 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. [6]

En Algérie, il existe très peu de rivières, ce qui diminue considérablement la disponibilité des agrégats alluvionnaires et donc roulés, qui sont à la base de la confection d'un bon béton auto plaçants. Malgré ça, on pourra encourager les entreprises de construction algériennes à utiliser ce type de formulation, d'où l'intérêt pour le développement de l'industrie de la construction en Algérie. [9]

I .5.les avantages et inconvénients des BAP

Les BAP présentent de nombreux avantages : [14]

- Mise en œuvre sans vibration ;
- Bétonnages plus rapides et optimisation de productivité sur chantier ;
- Coulage de murs verticaux de grande hauteur ;
- Bétonnage de formes complexes avec un excellent remplissage ;
- Plus grande fluidité pour un meilleur pompage ;
- Enrobage des armatures amélioré ;

- Optimisation de la qualité de parement ;
- Amélioration des conditions de travail sur le chantier ;
- Absence de nuisance sonore liée à la vibration

Comme inconvénients, on distingue

La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et l'entrepreneur du chantier.

- En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent.
- De plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours

I.6.composition spécifique des BAP

La formulation des BAP est basée sur les critères suivants

a)Une quantité de fines importante :

La composition des bétons auto plaçants comporte une quantité de fines importante (500kg/m^3 de diamètre inférieur à $80\ \mu\text{m}$) assurant la maniabilité et limitant les risques de ségrégation et ressuage. Le liant utilisé est généralement un mélange de deux ou trois constituants pour éviter l'élévation de température du béton lors de la prise de ce dernier.

b) Un volume de pâte élevé

Le rôle de la pâte (ciment + addition + eau efficace + air occlus) est d'écarter les granulats pour réduire les frottements provoquant la limitation vis-à-vis de l'étalement du béton et la capacité de remplissage des coffrages.

c)Utilisation d'adjuvant (super plastifiant)

L'ajout des super plastifiants conférant aux BAP leur maniabilité, cet ajout doit être proche du dosage de saturation et jamais très élevé sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneurs en eau vis-à-vis du problème de ségrégation et du ressuage.

d) Eventuelle utilisation d'un agent de viscosité

Ces agents sont des dérivés celluloseux, des polysaccharides ou des suspensions

Colloïdales augmentant la viscosité de l'eau. Ils empêchent le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse. Ces adjuvants tillent pour des bétons ayant des rapports eau/liant élevés, mais leur emploi pour des BAP ayant un faible rapport E/L n'est jamais justifié. Les agents de viscosité sont connus pour rendre les bétons auto plaçants moins sensibles à des variations de la teneur en eau, ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de maniabilité.

e) Un faible volume de gravillon

Pour un confinement donné, les risques de blocage croient avec l'augmentation des Teneurs en gros granulats. Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, le diamètre maximal des gravillons dans un BAP étant compris entre 10mm et 20mm. Le rapport G/S pour les BAP est proche de 1.

I.7. Les constituants du BAP

Un béton est constitué de deux parties principales : les granulats et la pâte (voir figure1). Par rapport aux bétons classiques, les BAP ont deux constituants supplémentaires qui doivent être présents dans la composition du béton. [3]

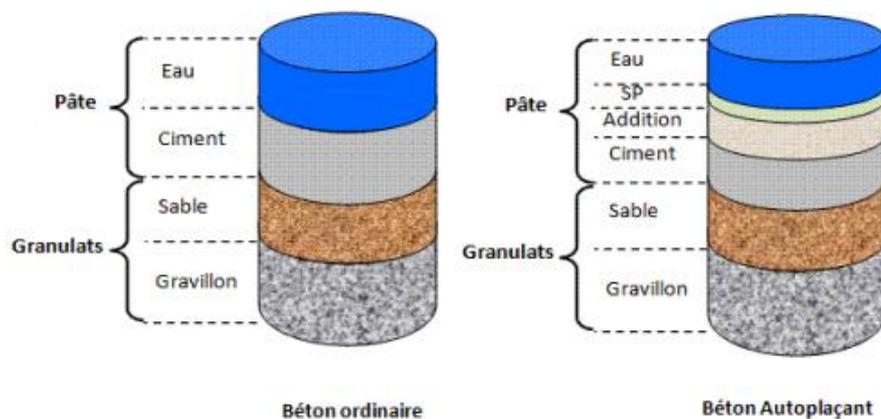


Figure I.2 Constituants des bétons Ordinaires et des BAP [3]

Les constituants du BAP ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des BAP à l'état frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître le rôle que peut jouer chaque constituant ainsi que leur influence sur les propriétés des BAP.

I.7.1 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%. [10]

Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont :

- Le silicate tricalcique, 3CaO.SiO₂, que l'on écrit C3S ;
- Le silicate bicalcique, 2CaO.SiO₂, que l'on écrit C2S ;
- L'aluminate tricalcique, 3CaO.Al₂O₃, que l'on écrit C3A ;
- L'aluminoferrite tetracalcique, 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃, 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. [10]

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-CEMII/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. [10]

I.7.2 Les différents types de ciment :

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principale. Ils sont notés CME et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) [10]

CEM I: Ciment Portland (CPA)- CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).

CEM III : Ciment de haut-fourneau (CHF).- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).

CEM V : Ciment composé (CLC).

I.7.3 Les additions minérales

Le béton auto plaçant requiert souvent pour l'amélioration de ses propriétés rhéologiques, l'addition de particules fines inertes ou réactives, qui régulent aussi la quantité de ciment dans la formulation et réduisent ainsi la chaleur d'hydratation cause d'un fort retrait [35].

Ce sont des produits de dimension granulaire inférieure à 80 μ m, obtenus par broyage fin, récupération des déchets des centrales thermiques ou pulvérisation de certaines roches (calcaire, silice, etc.)[35].

L'utilisation des ajouts minéraux a des avantages : techniques ; économiques et écologiques.

- **Avantages économiques et écologiques**

La plupart des additions minérales sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). Ainsi l'incorporation des additions minérales à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO₂ de l'industrie cimentière dans la nature [6,17].

- **avantages techniques**

En général, les additions minérales influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci ; elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau. Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les additions minérales réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique [24].

I.7.4 Les granulats

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0mm et 40mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. [10]

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

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants.

Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport granulats/sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le D_{max} augmente. Ainsi, le D_{max} des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm. [8].la plupart des bétons autoplaçant $D_{max}=16$.

I.7.5 l'eau :

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au delà des

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

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

-30 g/l pour les bétons à faibles résistances

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de super plastifiants. [10]

I.7. 6 le super plastifiant :

Les super plastifiants 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. [10]

Les super plastifiants 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 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.

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. [10]

L'utilisation de super plastifiants dont l'action est schématisée sur (Figure I.5) Permet de Concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau.

- 1–Augmentation de la fluidité (teneur en eau égale)
- 2–Diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité
- 3–Diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

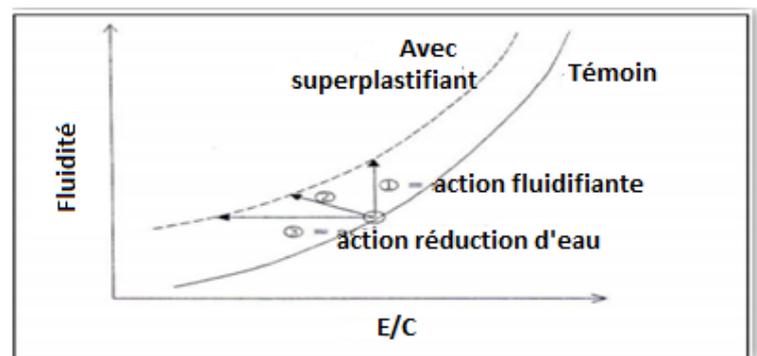


Figure I.3 Les actions des super plastifiants [10]

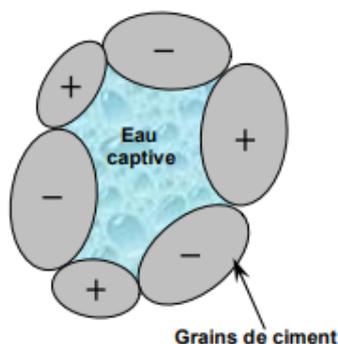


Figure I.4 Pâte de ciment non adjuvantée

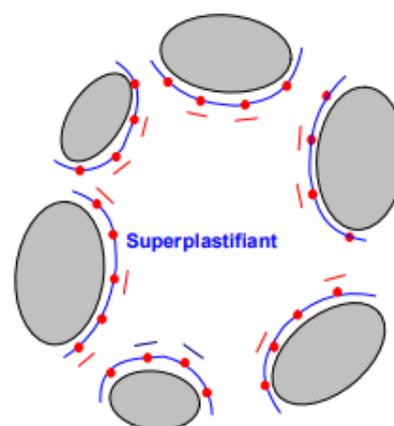


Figure I.5 Pâte de ciment additionnée d'un super plastifiant [20]

I.7.7 les adjuvants :

Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés dans les bétons à des doses précises du poids de ciment et selon leur plage d'utilisation indiquée par le fournisseur. Leur introduction dans le mélange engendre des phénomènes physico-chimiques très complexes et ils ont pour but d'améliorer les propriétés des bétons à l'état frais ou à l'état durci. [10]

I.8.les fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NFP18–305. Parmi ces caractéristiques, deux sont particulièrement significatives :

- Une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomite) ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium CaCO_3 ,
- Une valeur minimale de l'indice d'activité Les dimensions des particules de fillers s'étendent de quelques μm à quelques dizaines de μm , déterminées en utilisant la granulométrie laser.

I.8. 1 Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des BAP

L'introduction des fillers calcaires dans la composition d'un BAP engendre des modifications significatives sur les propriétés à l'état frais et durcis [11]. A l'état frais les fillers induisant une augmentation de la compacité et par conséquent une baisse du transfert calcaires modifient la structure du squelette granulaire en améliorant la capacité d'empilement des particules fines c'est l'effet granulaire. A l'état durci ils présentent un caractère liant supplémentaire car le calcaire n'est pas strictement inerte du point de vue chimique, en présence d'un liant hydraulique, il conduit à la formation d'hydrates. Aussi ils aident à la réduction de la chaleur d'hydratation, et en conséquence la diminution du retrait endogène, et aussi d'humidité et du retrait de séchage, par contre le gonflement dans le milieu immergé devient plus grand [12].

I.9. Les différentes approches de formulation

I.9.1 Méthode de formulation pratique des BAP

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique, La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée [2]. Car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont les composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années. Certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- La masse du ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE [NF EN P18 305], soit en général de 300 à 350 kg/m³ En complément la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³ .

Le dosage en super plastifiant est proche de son dosage à saturation, La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception sur le papier, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

I.9.2 Formulations des BAP existants dans la bibliographie

De multiples approches sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton auto plaçant. Dans ce qui suit, un exposé général sur les approches principales.

I.9.2.1 Approche japonaise

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

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

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

I.9.2.2 Approche CBI (suédoise)

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cement Och Betong Institutet) et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette approche est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures et le volume des granulats dans le béton. [4], [5], [6]

Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués par différents auteurs cités par ([7], [8], [9], [10]) sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles.

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

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

Les principales modifications et extensions de la méthode CBI sont apportées par [1], qui a proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Il s'agit d'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats.

I.9.2.3 Approche LCPC

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

Le modèle permet d'avoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des différents constituants comme par exemple la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre.

Des auteurs [4],[3] ont testé les trois approches et souligné quelques remarques issues des essais qu'ils ont menés. Ils estiment que l'approche LCPC (appuyée par le logiciel développé) donne les résultats les plus satisfaisants

Toutefois, les trois méthodes décrites, ne sont pas adaptées pour la formulation de bétons auto plaçants contenant des agents de viscosité. L'apport d'un adjuvant de telle nature augmente significativement la viscosité du mélange, ce qui nécessite probablement des ajustements et des modifications importantes sur les méthodes de formulation des BAP.

I.10 caractérisation d'un béton auto plaçant

I.10.1 propriétés des BAP à l'état frais

Les propriétés générales d'un béton auto plaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques :

Le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage [14], [12].

I.10.2 le remplissage

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton auto plaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects. [14]

I.10.3 la résistance à la ségrégation:

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [15],[16].

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en Élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité.

I.10.4 la capacité de passage:

Le béton auto plaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures.

En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. [14]

Donc, un béton est qualifié d'auto plaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation. Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en dans le tableau I.1 œuvre

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. [14]

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). [9]

I.11. caractérisation des BAP à l'état frais

Lors de la formulation la caractérisation des BAP est nécessaire, Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Les

principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés citées ci-dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton de par sa fluidité, sa stabilité et son absence au blocage. Ce qui suit résume les différents tests d'ouvrabilité qui caractérisent les bétons auto plaçants.

Tableau I.1 Propriétés d'ouvrabilité des BAP.

Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Actions à mener dans la formulation
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation des superplastifiants
		Optimisation du rapport E/C
Résistance à la ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Réduction du rapport E/C
		Utilisation de matériaux de grande surface
		Utilisation d'agents de viscosité
Résistance à la ségrégation	Réduction de la séparation de phases	Réduction du rapport E/C
		Utilisation d'agents de viscosité
		Réduction de la taille maximale des granulats
Capacité de passage	Réduction de blocage des granulats	Réduction du volume de gravier
		Réduction de la taille maximale des granulats

I.11.1 Essai de l'étalement (Essai au cône d'Abrams)

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant d'évaluer la fluidité est l'essai d'étalement réalisé avec le cône d'Abrams. Le principe de cet essai est de mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône (figure I.6).

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre caractérisant de la fluidité, plus il est grand, plus le béton est fluide (grande capacité de remplissage). L'étalement final d'un béton auto plaçant peut varier entre 50cm et 80cm en fonction de l'utilisation du béton [10].

Ceci permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).

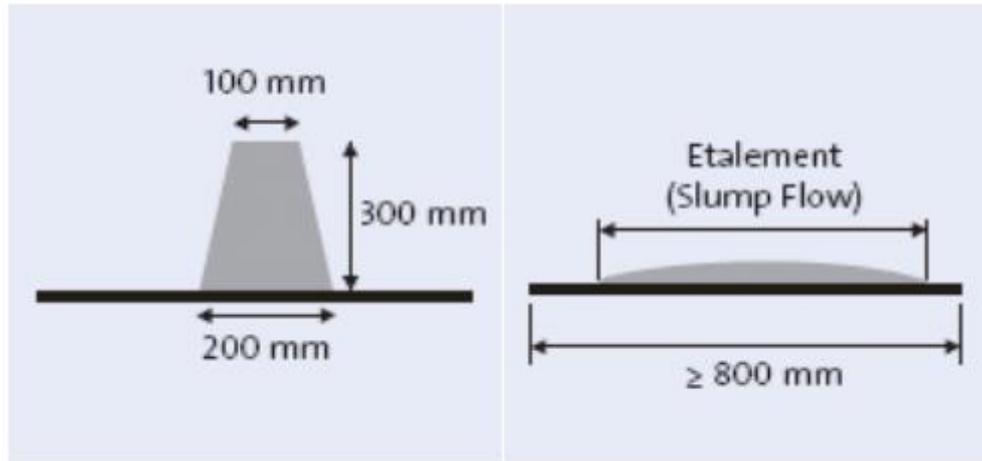


Figure I.6 Essai d'étalement [10]

- **Mesure de la vitesse d'étalement**

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Cette mesure, le T_{50} est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T_{50} traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Pour un béton auto plaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes [10], Cependant, certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons auto plaçants avec une faible vitesse de déformation.

I.11.2 Ségrégation dynamique (Essai de la boîte en L)

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

Lors de l'écoulement d'un BAP, les risques de séparation de la phase granulaire de la pâte sont très élevés, notamment en présence d'armatures. Au coulage du béton, la trajectoire des granulats se trouve modifiée, les granulats ont tendance à converger vers les mêmes endroits en formant des voûtes au voisinage des armatures bloquant alors l'écoulement du béton.

Le principe de cet essai (figure I.7), est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte, laisser le béton se reposer 1 min puis enlève la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers le ferrailage. On mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le taux de remplissage H2/H1.

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrillés. Selon le groupe association française de génie civil AFGC [1], le taux de remplissage doit être supérieur à 0,8.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation, il convient donc de diminuer le rapport G/S (augmenter la quantité de sable, ou diminuer celle des graviers), ou d'augmenter le volume de la pâte en maintenant le rapport E/C constant.

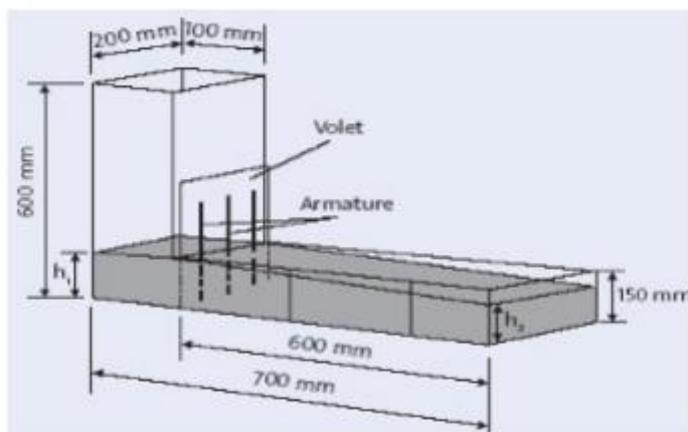


Figure I.7 boîte en L. [12]

I.11.3 Essais de ségrégation statique (Essai de la stabilité au tamis)

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

Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de stabilité au tamis (figure I.8). L'essai est développé par la société « GTM construction », il permet de qualifier les BAP vis à vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un sceau, puis couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur

de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis [16].



Figure I. 8 Essai de la stabilité au tamis. [16]

Critères d'acceptabilité :

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

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

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux.

I.11.4 Ressuage

Un BAP doit maintenir sa fluidité pendant la durée nécessaire pour son acheminement et sa mise en place. Or, pendant ce temps en vertu de la loi de la gravité, les matières solides ont tendance à s'enfoncer, tandis qu'une partie de l'eau de gâchage et des fines remontent en surface de l'échantillon de béton frais, créant ainsi le ressuage.

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

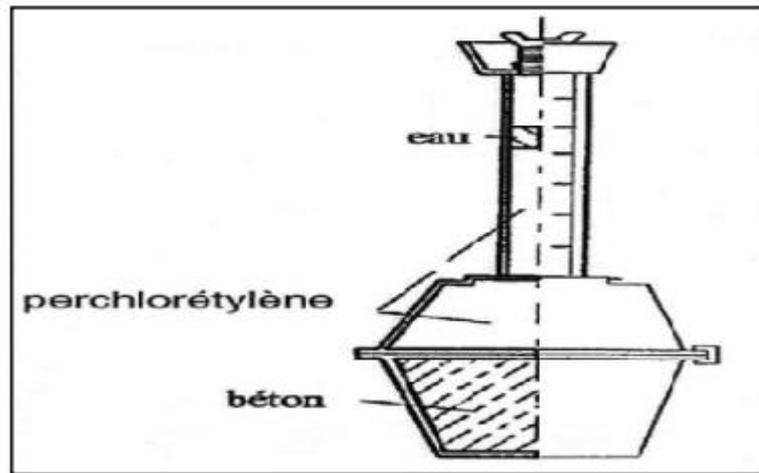


Figure I.9 Essai de ressuage à l'aéromètre.

I.12 Caractérisation d'un béton auto plaçant à l'état durci (destructif et non destructif:

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

a) Les essais destructifs:

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

b) Les essais non destructifs:

- Essai au scléromètre
- Essai d'auscultation dynamique

A) Essais destructifs du béton :

I .12.1 Les essais de compression :

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm conformément aux prescriptions de la norme.

Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon (Figure I.8).

La contrainte de compression à la rupture [Pa] est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée. [18]



Figure I.10 -Mesure de la résistance à la compression. [18]

I.12.2 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 I.9). 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. [11]



Figure I.11 Mesure de la résistance à la traction par flexion. [18]

B) Essais non destructifs du béton

Définition :

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, c'est pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps, plus souples d'évaluation de la qualité du béton.

Le contrôle par essais destructifs nécessite la confection d'éprouvettes prélevées représentant un échantillon. Ce contrôle ne peut être effectué à 100 % ou tout au moins sur un échantillonnage significatif. De plus, l'échantillon prélevé n'est pas toujours représentatif du béton de la structure réelle. Ainsi, pour répondre à ces problèmes, on a développé une gamme d'essais in situ appelés «Essais non destructifs » venant compléter les essais destructifs.

Les essais non destructifs consistent à prendre des mesures qui n'endommagent pas les constructions, Ils représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments. [18]

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement à l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles.

Ces essais sont rapides et faciles à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre de contrôles d'ouvrages neufs ou en construction comme de diagnostics d'état d'ouvrages anciens.

Principaux domaines d'application

Les essais non destructifs permettent de contrôler la qualité de la construction et mesurer de façon indirecte les caractéristiques des matériaux à savoir :

- La résistance
- L'homogénéité
- La porosité
- La durabilité ...

-Avantages des ces méthodes réside dans

Les méthodes non destructifs présentent les avantages suivants :

- La performance ou l'apparence de la structure n'est pas modifiée ;
- La possibilité de suivre le changement des propriétés du béton dans le temps ;

- Une plus grande sécurité, et une meilleure planification de la construction ;
- Une progression plus rapide et plus économique ;

I.13 Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons auto plaçants, L'objectif étant de les définir, ainsi que leurs multiples propriétés, les caractériser, et résumer les principales méthodes de leur formulation. Cependant, il lui faut assurer une fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation, une capacité de passage dans les milieux confinés et une excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de ferrailage dense. Le fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé.



**CHAPITRE II
RHEOLOGIE ET RHEOMETRIE
DES BAP**

CHAPITRE II

RHEOLOGIE ET RHEOMETRIE DES BAP

II .1Introduction

La rhéologie est définie comme étant l'étude de l'écoulement et de la déformation de la matière sous l'action d'une contrainte. Comme certains matériaux ne répondent pas exactement à la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides, le vocable « rhéologie » a été inventée par des physiciens spécialistes de l'étude des matériaux dirigés par Eugene Cook Bingham. Entre le solide parfait et le liquide parfait newtonien, il est devenu nécessaire d'élaborer une discipline nouvelle. L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis son apparition en 1928 [21] avec l'apparition de nouvelles substances au comportement complexe telles que: pâtes, boues, suspensions, émulsions, polymères, etc. Pour le cas du béton, l'étude se base sur l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable. Pour étudier les paramètres de l'écoulement du béton, certaines notions doivent être décrites [19, 20].

II.1.1 Contrainte de cisaillement

Considérons deux couches au contact l'une de l'autre, elles se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il en résulte l'apparition de forces de frottement τ [Pa], qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche [21], ce sont les forces de cisaillement (figure I.1).

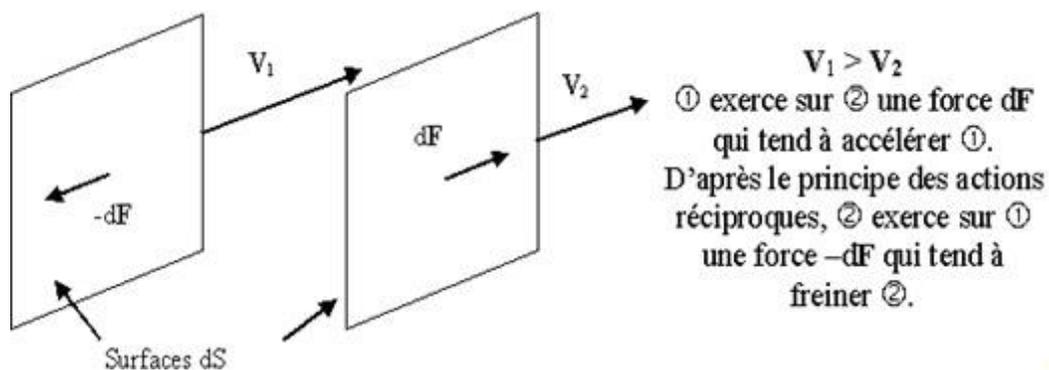


Figure II.1 Schéma de la contrainte de cisaillement.

Ces forces dépendent de la surface considérée d'où la contrainte de cisaillement est définie par

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

Où:

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

dS : surface élémentaire d'une couche cisailée.

La contrainte de cisaillement est une grandeur définie en tout point du matériau. Elle varie en général d'une couche à l'autre mais elle demeure constante en tout point de la même couche.

II.1.2 Vitesse de cisaillement

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles emprisonnées entre deux plans parallèles de surface S séparée d'une distance dz . Un des plans est fixe, et le second se déplace d'une distance dx à une vitesse constante de norme (figure II.2).

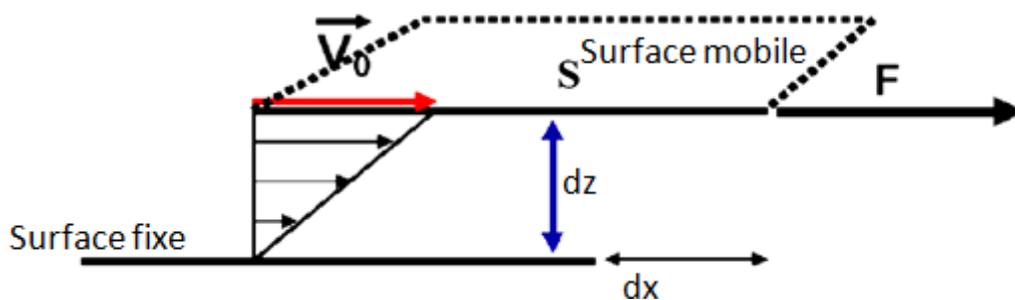


Figure II.2 Schéma de vitesse de cisaillement.

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. Il se crée un gradient de vitesse entre les deux plans. Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbolisée γ suivant la relation ci-après

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

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 [22].

II.1.3 Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimale à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous de cette valeur, cette mixture se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes). De Larrard et al. [23] ont considéré que le seuil de cisaillement τ_0 [Pa] est la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton y compris les grains de ciment et les particules ultrafines (figure 1.3).

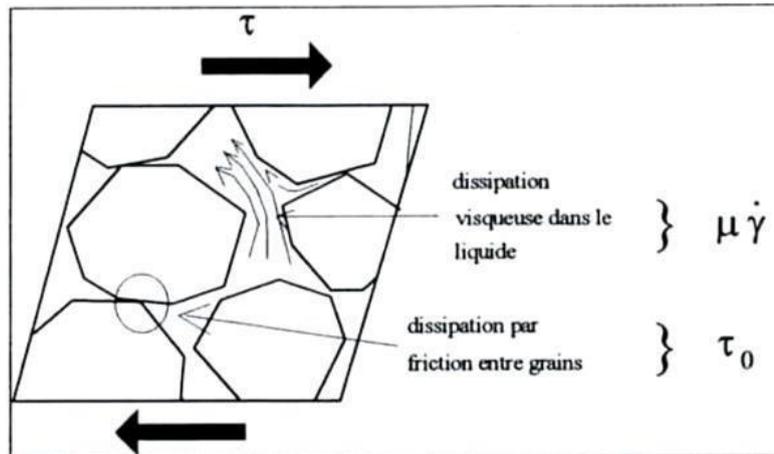


Figure II.3 Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [23].

II.1.4 Viscosité

La viscosité plastique est le résultat macroscopique de dissipations visqueuses engendrées par le mouvement de l'eau dans la porosité du système granulaire. D'après Couarraze et Grossiord [21], la viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. Elle est caractérisée par un coefficient de viscosité qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Pour certains fluides, sa connaissance suffit à caractériser de façon précise leur comportement rhéologique. En Principe, on considère idéalement un liquide au repos comme un ensemble de couches moléculaires parallèles soumises à une contrainte tangentielle. Si une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente (figure 1.4), 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 viscosité μ [Pa. s].

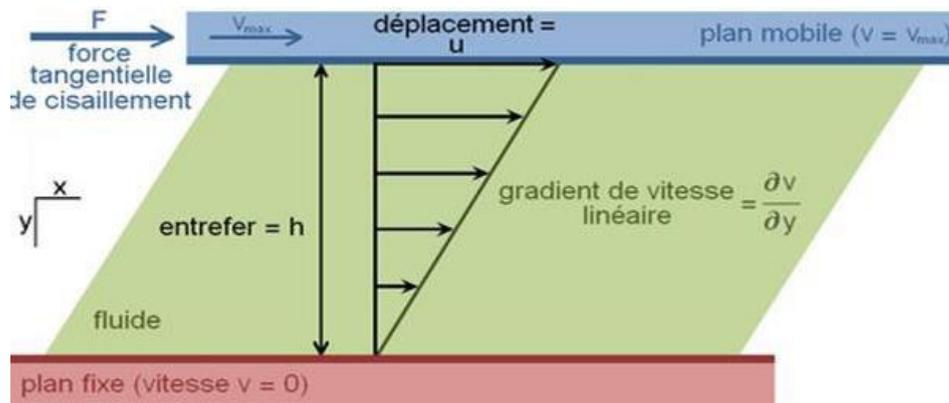


Figure II.4 Schéma de glissement des couches [22].

On distingue la viscosité dynamique et la viscosité cinématique.

a) 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 [22]. Le coefficient de viscosité dynamique peut être défini mathématiquement par la formule suivante :

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

Où:

τ : indique la force par unité de surface $\frac{dF}{dS}$

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement appelé gradient de vitesse $\frac{\partial v}{\partial y}$ Son unité de mesure est la s^{-1} .

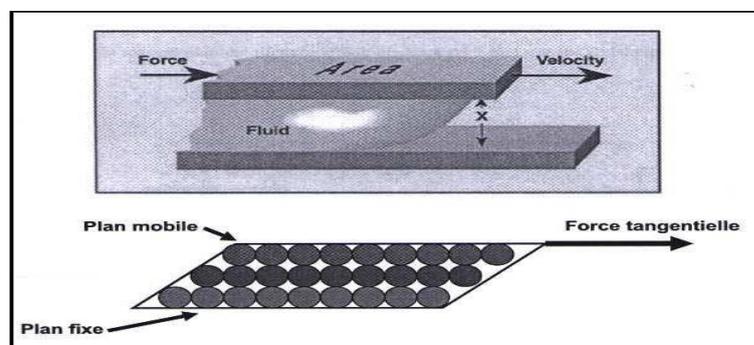


Figure II.5. Glissement des couches [22]

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) [22].

b) 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 cinétique. On définit la viscosité cinétique ϑ d'un fluide à partir de sa viscosité dynamique μ . 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 $1 mm^2/s$.

II.2 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 . [24]

II.3 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 : [25]

- 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 rhé fluidifiants ou rhé épaississants.
- 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.

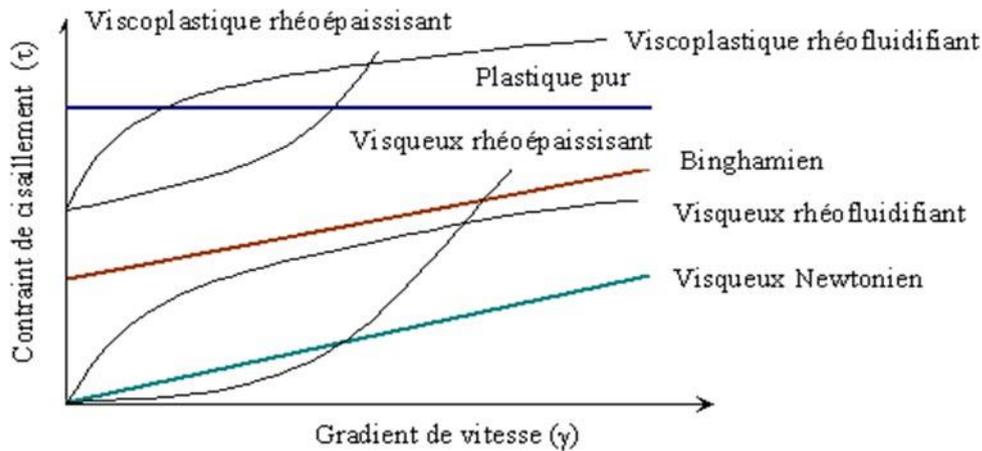


Figure II.6 Les types de comportement rhéologique [22].

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. [22]

II.4 Appareils de mesures de rhéologie

L'étude de la rhéologie du béton frais est une science relativement jeune. À ce jour, plusieurs études en laboratoire ont été réalisées. Plusieurs rhéomètres à béton sont maintenant disponibles sur le marché permettant de mesurer les paramètres rhéologiques du béton. Dans cette perspective, on présente quelques rhéomètres qui sont approuvés et utilisés pour estimer les paramètres rhéologiques dans certains travaux de recherche.

II.4.1 Rhéomètres agitateurs-malaxeurs (Two-point-test, IBB)

Le premier des appareils rhéomètres de type malaxeur est créé en 1987 par Tattersall et al [25] appelé MK1, il s'agit du Two-point-test. Cet appareil est, en fait, un malaxeur instrumenté qui permet de déterminer la relation entre le couple de malaxage et la vitesse de rotation de la pale. Le principe de l'appareil a été modifié en changeant la géométrie de l'agitateur pour donner les deux versions MK2 et MK3. Le MK2 est conçu pour les bétons de grande maniabilité (affaissements supérieurs à 75 mm au cône d'Abrams). L'agitateur de forme cylindrique est garni de pales de forme hélicoïdale ininterrompue. Il s'agit d'un des appareils les plus utilisés en laboratoire. Le MK3 est utilisé pour les bétons de faible maniabilité (affaissements inférieurs à 50 mm). L'agitateur en forme de H effectue lors des essais un

mouvement planétaire (figure II.7). Ce mouvement permet de conserver l'échantillon homogène lors des essais.



Figure II.7 Rhéomètre Two-point-test [26].

Le rhéomètre IBB est développé en 1994 par Beaupré et al. [20]. Cet appareil est complètement automatisé (figure II.8). Les vitesses et les couples sont mesurés et enregistrés automatiquement, sur l'ordinateur à l'aide d'un capteur de vitesse et d'une cellule de charge placée sur l'arbre principal. Il peut mesurer les paramètres rhéologiques de divers bétons jusqu'à des affaissements de 25 mm.



Figure II.8 Rhéomètre à béton IBB [20].

II.4.2 Rhéomètres à cylindres coaxiaux (BML, Cemagref)

Le rhéomètre BML (building material learning) est un rhéomètre à cylindre coaxial avec une rotation de cylindre extérieur tandis que Le cylindre intérieur est fixe (figure II.9). Ils ont été développés par Wallevik et Gjørvi [27]. Les cylindres sont munis de rebords parallèles à leur axe. Ces géométries permettent de limiter le glissement à la surface des cylindres. La consommation du béton est importante au cours de cet essai (17 litres). Il est à signaler que cet appareil est entièrement piloté par ordinateur.



Figure II.9 Rhéomètre BML[28]

D'après Coussot et al [28], Le Rhéomètre du Cemagref est un rhéomètre à cylindres coaxiaux avec une rotation du cylindre interne contrairement au BML. Il a été utilisé dans le domaine de la géotechnique, plus précisément dans la mesure rhéologique des boues et des laves torrentielles. Il nécessite une quantité importante du béton (500 litres) pour effectuer un essai (figure II.10).



Figure II.10 Rhéomètre à béton du Cemagref [28]

II.4.3 Rhéomètre plan-plan (BT Rhéom)

Le BT Rhéom est un rhéomètre composé de deux plans un en rotation et l'autre fixe (figure II.12). Ce rhéomètre est développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de Paris par une équipe dirigée par De Larrard au début des années 1990 [29]. Il peut inclure 7 litres de béton. L'avantage de ce rhéomètre est que les paramètres rhéologiques sont calculés et obtenus directement en unité fondamentale et il peut être utilisé sur chantier comme en laboratoire.



Figure II.11 Rhéomètre à béton BT Rhéom [29].

II.4.4 Rhéomètre ICAR

A ce titre, Koehler E. et *al.* (2004) ont développé le rhéomètre ICAR, 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 (figure II.12), qui doit être placée au centre du béton (C.à.d. doit être placée à un niveau de 13 cm par rapport au fond des récipients et doit être entièrement ouverte 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 auto-plaçants, 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.



Figure II.12 rhéomètre ICAR [29]

II.5 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 (Tattersall et Banfill, 1983). 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 [24].

II.6 Rhéologie des bétons auto plaçants (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.7 Influence des paramètres de formulation

Les effets de l'air, de l'eau, de la calcaire et des super plastifiants (SP) sur les propriétés rhéologiques du béton et du mortier ont été étudiés par [Wallevik, 1983] avec un rhéomètre de type Couette.

II.7.1 Eau et air

Ils ont montré par exemple que 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 [Wallevik et Wallevik, 2011].

II.7.2 Super plastifiants (SP)

L'ajout de super plastifiants (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 super plastifiants 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.12).

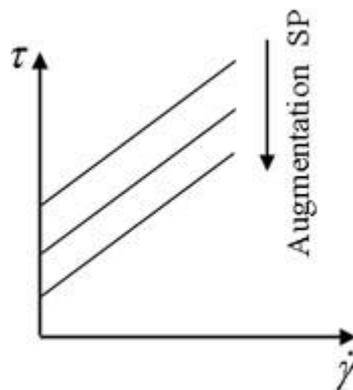


Figure II.13 Rhéogramme illustrant l'influence de SP sur les propriétés rhéologiques des bétons [Wallevik, 1983]

II.7. 3 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 (De Schutter, 2011).

Bien qu'ils soient généralement inertes, les fillers calcaires peuvent participer, dans certains cas, aux réactions d'hydratation liés à la phase de l'aluminate par la formation du monocarboaluminate (Bonavetti et al. 2001). 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 (Le, 2014). Toutefois, une grande partie de l'eau restera presque entièrement disponible pour la réaction du ciment (De Schutter, 2011). Plusieurs études ont traité l'effet de l'incorporation des fillers calcaires dans les bétons autoplaçants. Ghomari et al. (2011) ont remarqué que la substitution du ciment par des fillers calcaires contribue à diminuer l'étalement des BAP et augmenter leurs temps d'écoulement au V- Funnel. Cet effet est accentué au-delà de 20% de substitution.

Ghezal et al. (2002) ont étudié l'influence des fillers de densité égale à 2.65, présentant une surface spécifique de $5650 \text{ cm}^2/\text{g}$ 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 présentes dans le mélange à des taux supérieurs à 100 kg/m^3 . Par ailleurs, l'augmentation du dosage en fillers calcaires permet de réduire la demande en super plastifiant pour une ouvrabilité donnée (Ghezal et al. 2002 ; Sonebi et al. 2004), surtout avec les poly-carboxylates (Adjoudj, 2015). Par contre, la perte de fluidité après 45 minutes dépende du dosage en ciment (figure II.13) (Ghezal et al. 2002).

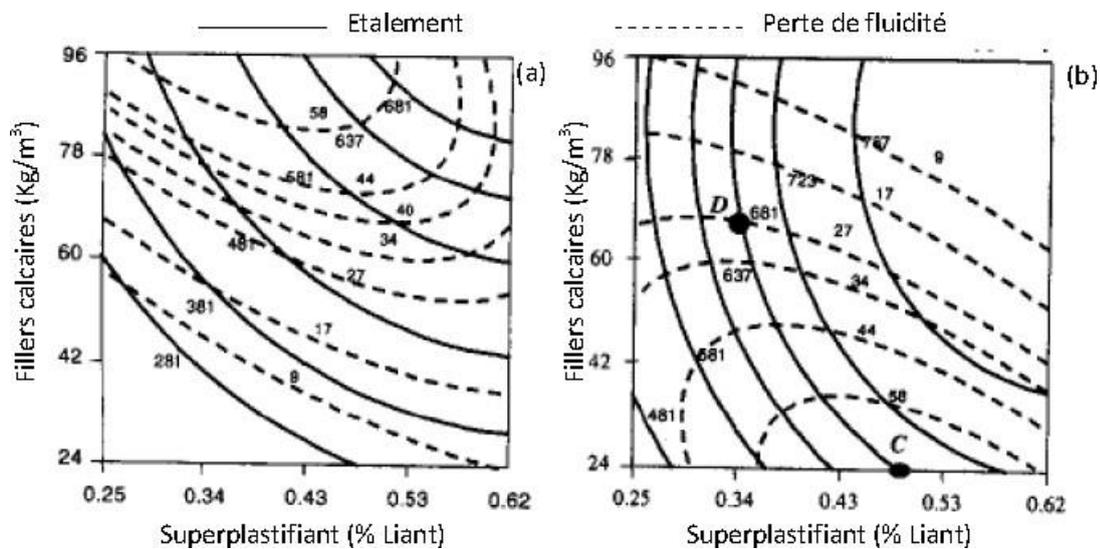


Figure II.14 : Diagramme de contours de l'étalement à T0 et de la perte de fluidité à T45 pour des mélanges avec fillers calcaires et super plastifiants ($E/L = 0,55$)
 (a) Ciment = 290 Kg/m^3 ; (b) Ciment = 360 Kg/m^3 (Ghezal et al. 2002).

Récemment, Wen-Qiang et al. (2016) ont 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.

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 (Corinaldesi et al. 2011). 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. El Hilali (2009) a conclu dans ses recherches 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.

A l'échelle du béton, pour un dosage en eau constant, Esping (2008) 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.

Sur le plan chimique, Nehdi (2000) 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.

Les impuretés telles que les argiles ou les graphites présentes dans les fillers réduisent la capacité d'écoulement en raison d'une demande en eau accrue (Michel, 2007) ou encore à cause des interactions avec les adjuvants chimiques (Diederich, 2010).

Haddadou (2015) a trouvé que le dosage optimum des fillers qui satisfait les exigences du BAP dépende 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. Ce résultat est dû au taux d'absorption qui est proportionnel à la progression de la SSB. Par ailleurs quand la poudre de marbre est employée, la fluidité est légèrement réduite.

Mucteba et al. (2011) 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.16) 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.

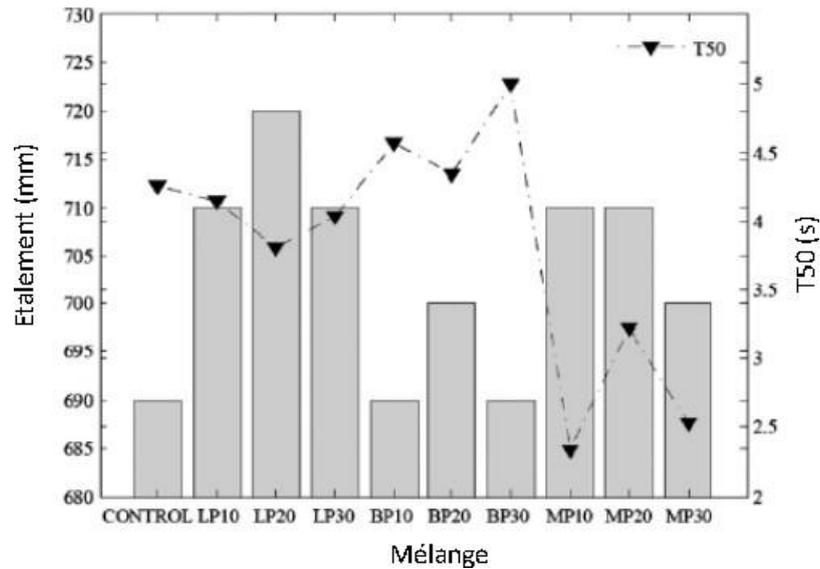


Figure II.15 Etalement et T500 des BAP avec fillers calcaires (LP), poudres de basalte (BP) et poudres de marbre (MP) (Mucteba et al. 2011)

II.7.4 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) [Aissoun, 2011 ; De Larrard; Khayat *et al.*, 2000; Koehler et Fowler, 2007]. 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.

II.8 Conclusion

Le développement technologique des rhéomètres vise essentiellement une caractérisation rhéologique complète permettant une caractérisation d'ouvrabilité sans avoir recours aux tests empiriques. Ces derniers sont souvent jugés dépendants de la compétence et de l'expérience de l'opérateur, par contre les valeurs du seuil et de la viscosité sont beaucoup moins dépendantes de facteurs. Par conséquent, une corrélation entre les grandeurs rhéologiques et les propriétés d'ouvrabilité est donc jugée très importante.



CHAPITRE III
CARACTERISATION DES
MATERIAUX UTILISES

CHAPITRE III

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés pour confectionner nos mélanges, et qui sont également présentés pour analyser et justifier ultérieurement les résultats d'essais au laboratoire de génie civil de l'université de BBA.

III.2 Matériaux utilisés

Les différents matériaux utilisés dans cette étude sont :

- Le sable de dune provenant d'OUAD SOUF.
- Le sable concassée provenant de Sétif.
- Deux fractions de gravier concassé (3/8 ,8/15) provenant de la carrière Mechri **BBA**
- Ciment **CEM II / B 42.5** provenant de la cimenterie Lafarge de Hammam DaLàa «M'sila».
- L'adjuvant de Granitex : Medaplast **SP30** super plastifiant provenant d'Alger.
- Les ajouts :
- Filler de calcaire acquis à partir du broyage de leur roche dans la cimenterie **d'Ain El-kebira Sétif.**
- Poudre de céramique acquise à partir du broyage de leur déchet dans la cimenterie **d'Ain El-kebira Sétif.**
- L'eau de gâchage : eau potable fournie au niveau de notre labo.

III .3 Caractéristiques du sable utilisé :

III.3 .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 où 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, la connaissance

de la grosseur de grains de granulats dans la composition du béton, est nécessaire, 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.

L'analyse permet aussi de calculer le module de finesse du matériau et en particulier celui du sable, qui est un facteur important dans une étude de composition de béton.

➤ **Correction éventuelle du module de finesse du sable concassé**

Les résultats obtenus sont représentés après la correction du sable concassé ayant un module de finesse élevé par un sable de dune ayant un module modéré ;

On pourra utiliser la règle d'Abrams : supposons par exemple que l'on dispose d'un sable S_1 de module de finesse trop fort M_1 et que l'on désire y ajouter un sable fin S_2 de module de finesse M_2 afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse serait M_f ; les proportions des deux sables composant devront être les suivantes

$$\text{Proportions : } S_1 = \frac{M_f - M_2}{M_1 - M_2}$$

$$\text{Proportions : } S_2 = \frac{M_1 - M_f}{M_1 - M_2}$$

$M_1 = 3,137$ (sable concassé S_2)

$M_2 = 1,942$ (sable de dune S_1)

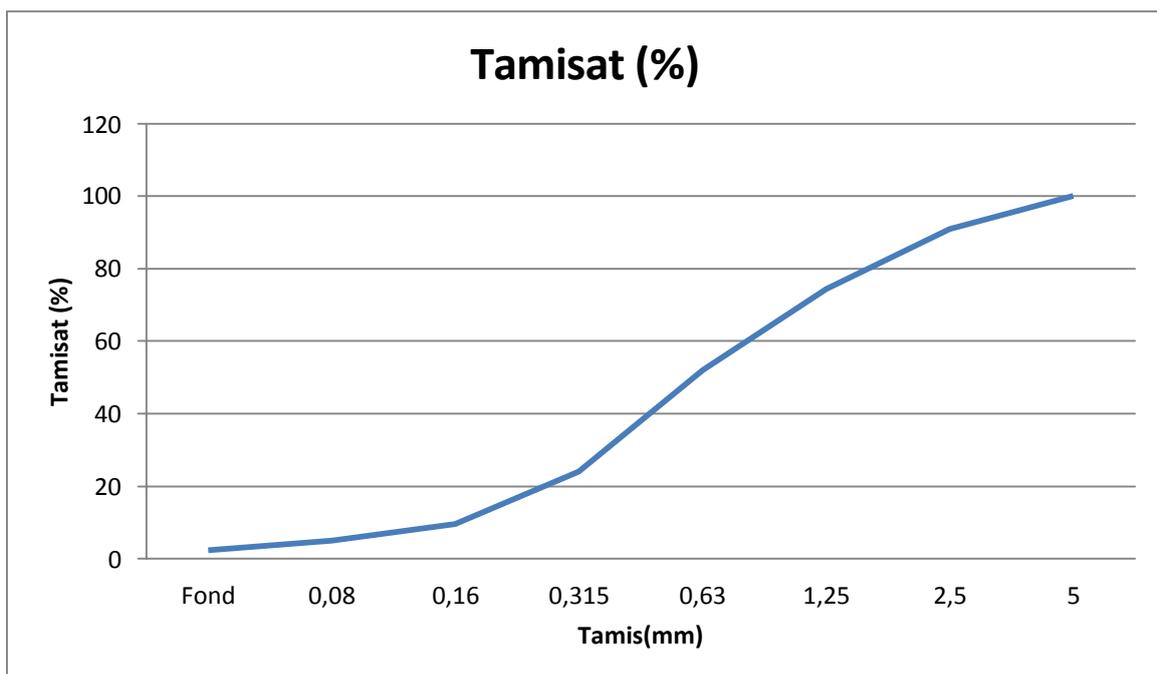
$M_f = 2,5$ (sable corrigé)

$$\text{Proportions : } S_1 = \frac{2,5 - 1,942}{3,137 - 1,942} = 46,69\% \text{ (sable de dune)}$$

$$\text{Proportions : } S_2 = \frac{3,137 - 2,5}{3,137 - 1,942} = 53,31\% \text{ (sable concassée)}$$

Tableau III. 1 Analyse granulométrique du sable composé

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2,5	91	91	9,1	90,9
1,25	166	257	25,7	74,3
0,63	223	480	48	52
0,315	280	760	76	24
0.16	145	905	90,5	9,5
0,08	45	950	95	5
Fond	27	977	97,7	2,3

**Figure III.1 Courbe granulométrique du sable composé**

III.3.2 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 cumules des tamis de mailles : [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 et 5mm] sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum R_c / 100 \text{ où : } R_c \text{ est le refus cumulé}$$

Les normes soviétiques spécifient M_f des sables comme suit

Tableau III.2 classification des sables en fonction de module de finesse

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

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

$$M_f = \sum R_c / 100 \text{ avec } R_c : \text{ refus cumulé on trouve } \mathbf{Mf=2,493}$$

- ✓ Le sable utilisé est considéré comme **un sable moyen**

III.3.3 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 (**h1**) et du sédiment (**h2**).

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

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

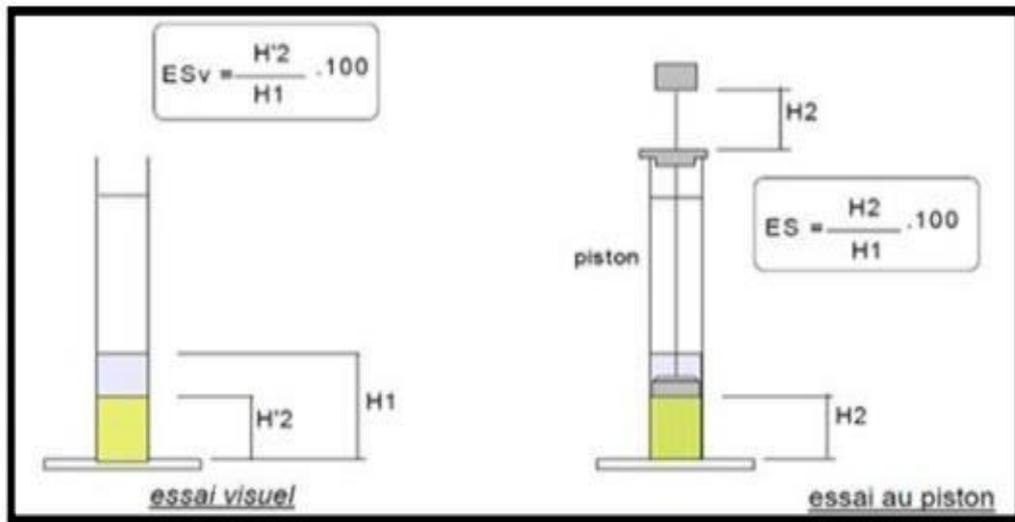


Figure III.2 Essais d'équivalent de sable.

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 fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.

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

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

h_2 : la hauteur du sable

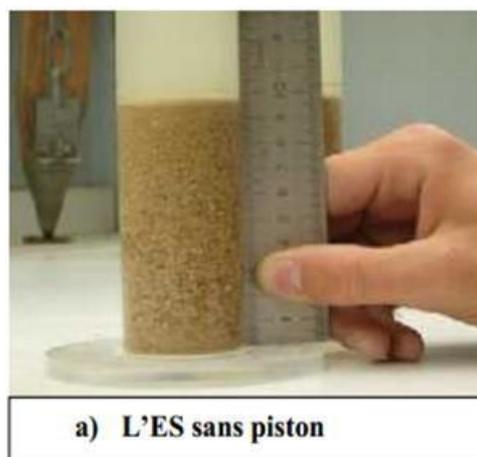


Figure III.3 Essai équivalent de sable exécutés au laboratoire

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 la règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que de zéro vienne buter contre la face intérieur de la tête du piston, soit 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 est la hauteur du sable +floculat h_2' : la hauteur du sable ($h_2' < h_1$)



Figure III.4 Essai équivalent de sable exécutés au laboratoire

Tableau III. 3: Équivalent de sable

N ° d'essai	h_1 (cm)	h_2 (cm)	E.S.V(%)	h_2 (cm)	E.S.P(%)
1	10,4	8,3	79,80	7	67,30
2	9,9	8,2	82,82	7,6	76,76

(E.S.V) moy = 81,31

argileux

(E.S.P) moy = 72,03

C'est un sable propre à faible pourcentage de farine

Tableau III.4: La classification de la nature sable en fonction d' E_s

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

III.3.4 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.

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

A. Sable de dune

Tableau III.5 : La masse absolue de sable de dune

N ° d'essai	M_g	(ml)	V (ml)	$\rho\left(\frac{g}{cm^3}\right)$
1	300	400	515	2.543
2	300	400	520	
3	300	400	519	

B .Sable concassée**Tableau III.6 : La masse absolue de sable concassée**

N ° d'essai	M _g	(ml)	V (ml)	$\rho\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$
1	300	400	520	2,64
2	300	400	510	
3	300	400	510	

III .3.4 Masse volumique apparente : [NF EN P 18-555]**Masse volumique à l'état lâche :**

- On déterminé la masse volumique apparent du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 1 litres.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- En pèse le récipient vide de capacité de 0.1l, soit M₁ 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 M₂ ce poids

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

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

A. Sable de dune**Tableau III.7: La masse volumique apparente à l'état lâche**

N ° d'essai	M(g)	V (ml)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{\text{app moy}}$ (kg/l)
1	1617	1000	1,617	1.62
2	1619		1,619	
3	1615		1,41	

B. Sable concassée

Tableau III.8: La masse volumique apparente à l'état lâche

N ° d'essai	M(g)	V (ml)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app moy}$ (kg/l)
1	1463	1000	1,463	1,46
2	1467		1,467	
3	1469		1,469	

III.3.5 Porosité et compacité et indice des vides : [NF EN P- 554]

Pour le sable d'Oued Souf et le sable concassée

Tableau III.9 : Porosité, compacité et indice des vides

sable	Porosité(%) $P = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \times 100\%$	Compacité(%) $C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} = 1 - P$	Indice de vides $E = \frac{P}{C}$
Sable de dune	36,29	63,70	0,56
Sable concassée	44,69	55,30	0,80

III.4 Caractéristiques du gravier utilisé :

III.4.1 Origine du gravier utilisé :

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

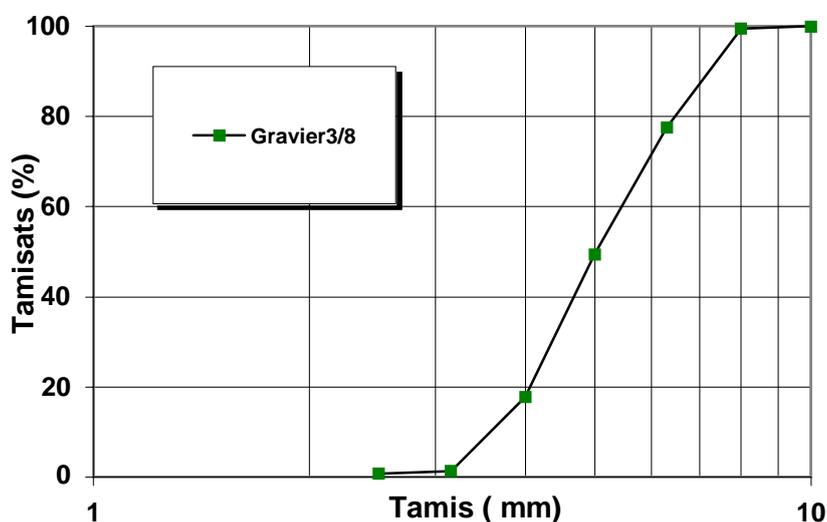
- Les fractions des graviers utilisés sont : la Fraction 3/8 et la Fraction 8/16

III.4.2 Analyse granulométrique :

Les résultats d'analyse granulométrique la fraction 3/8 et 8/16 sont les suivants :

Tableau III.10 : 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.5 Courbe granulométrique du gravier 3/8**Tableau III.11 : 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

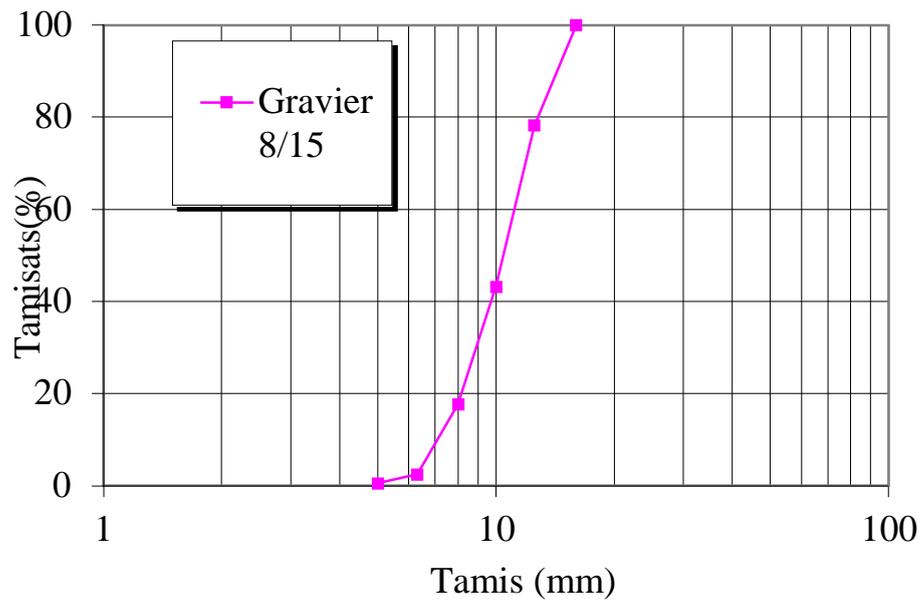


Figure III.6 Courbe granulométrique du gravier 8/16

III.4 .3 Masse volumique apparente : [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.

Mode opératoire :

Verser le granulat dans le récipient choisi et le disposer sous tassement par couches horizontales successives.

Araser la couche supérieure du granulat à l'aide d'une règle que d'on anime 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.12 : Masse volumique apparente du gravier

Gravier	Essais	M ₁ (Kg)	V(L)	γ (kg/l)	γ _{moy} (kg/L)
3/8	1	14,627	10	1,462	1,462
	2	14,515	10	1,451	
	3	14,53	10	1,475	
8/16	1	7,1325	5	1,427	1,425
	2	7,117	5	1,423	
	3	7,137	5	1,427	

III.4.4 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.13 : 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.4.5 Compacité, porosité et l'indice de vide : [NF EN P 18-554]

Le mode opératoire est semblable à celui effectuée pour le sable :

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

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

III.4.6 Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés

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

III.4.7 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 4840g

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

$$L_A = (m/M) * 100$$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles du matériau. (LA) Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon



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

D'après cette classification, Le gravier (8/16) est un gravier mis dure ($L_A=32.58\%$) (30 à 40), se trouve dans l'intervalle des graviers admissible

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

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.5.2 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^3/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.5.3 Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé

Tableau III.18 Les composition chimique du CEM II/B 42.5

Oxyde	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	SO_3	Na_2O
Teneur	20.7	4.75	62.92	3.75	1.90	1.98	0.09

Tableau III.19 Les composition minéralogique du ciment CEM II/B 42.5

Eléments	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Teneur (%)	59	14	6	100

III.6 Les Fillers de calcaire

Issus à partir d'un broyage

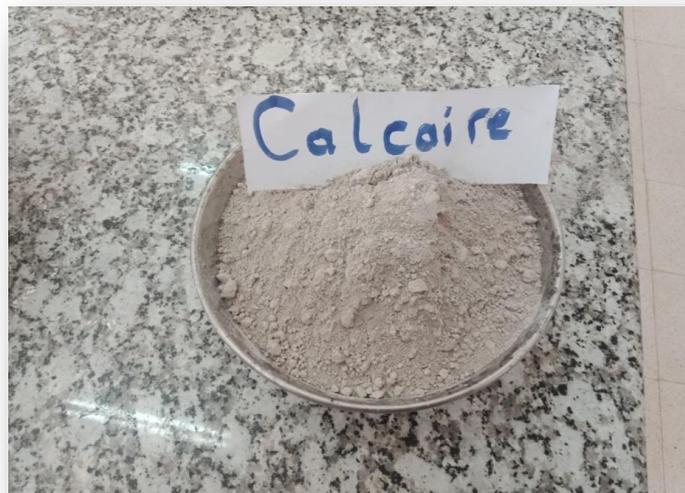


Figure III.8 fillers de calcaire

III.6.1 Caractéristiques physiques

La densité	2,71
La surface spécifique Blaine	5780 ² /g

III.6.2 Caractéristiques chimiques

Tableau III.20: La composition chimique de filler calcaire

Elément	Teneur(%)
S_iO_2	10,75
Al_2O_3	0,98
CaO	48,39
Fe_2O_3	0,55
MgO	0,90
SO_3	0,14
K_2O	0,08
Na_2O	0,09
Cl	0,002
Paf	38,11
LSF	152,98
AF	1,77
MS	7,00
titre	88,21

III.7 Poudre de céramique blanche

Issue à partir d'un broyage des déchets de céramique blanche

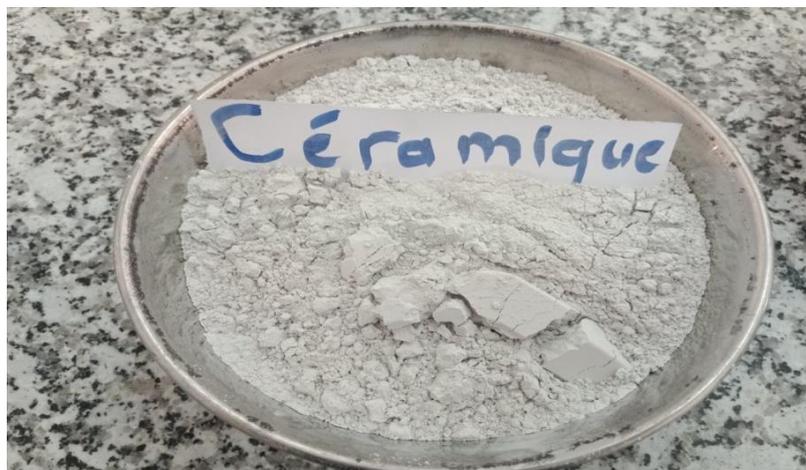


Figure III.9: Poudre de céramique blanche

III.7.1 Caractéristiques physiques

- La densité 2,76
- La surface spécifique Blaine 4294cm²/g

III .7.2 Caractéristiques chimiques

Tableau III.21: La composition chimique de céramique

Elément	Teneur(%)
SiO_2	59,38
Al_2O_3	22,40
CaO	0,39
Fe_2O_3	0,94
MgO	0,37
SO_3	0,02
K_2O	1,42
Na_2O	0,46
Cl-	0,002
Paf	14,62

III.8 Les Adjuvants

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

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

Tableau III.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.8.1 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	8.18	Acceptable pour le gâchage.
Conductivité	1250 µs/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/l	

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

III.10.1 Méthode française (LCPC)

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 super plastifiant 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.

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 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 :
- la proportion liant/filler est maintenue constante, les proportions granulats/ phaseliante sont optimisées.

III.10.2 Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC

- **Les données de base :**

On a choisi :

- $G/S=0,9$.
- On fixe le rapport $E/(C+F)=0,38$.
- Le dosage en super plastifiant, déterminé par l'essai de mini cône selon la fluidité, est 1,2 % de la masse du (ciment +filler).

- **Optimisation des constituants pour la formulation de base de BAP**

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

- 400 kg/m^3 du ciment.
- 40 kg/m^3 Ajout (calcaire) (10% du poids du ciment).
- $E/(C+F)=0,38$.
- $G/S=0,9$.

- **Détermination de la masse de chaque constituant dans 1m³**

C=400 kg

Calcaire =40 kg

$E/(C+F)=0,38$ donc $E=0,38 \times (400+40)$ $E= 167,2 \text{ l/m}^3$.

Le volume de la pâte égal $334,26 \text{ l/m}^3$.

Donc le volume de granulats $G+S = 665,74 \text{ l/m}^3$; $G= 665,74 -S$

$S = 665,74 / 1,9$; $S = 350,38 \text{ l/m}^3$ d'où $G= 315,36 \text{ l/m}^3$.

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

$SP=0,012 (400+40)$ d'où **SP=5,28 Kg/m³**, alors le volume V_s de la matière sèche du Super

plastifiant sera $V_s = \frac{5,28 \times 100}{30 \times 1,078} = 16,32 \text{ l/m}^3$

- Donc la quantité d'eau V_{liq} provenant du super plastifiant sera

$$V_{liquide} = \frac{16,32 \times 70 \times 1,078}{100} = 12,31 \text{ l/m}^3$$

- Alors la quantité d'eau utilisée par 1m³ est de $154,89 \text{ l/m}^3$.

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

- Eau = $154,89 \text{ l/m}^3 \times 1 = 154,89 \text{ Kg/m}^3$
- Sable : **53,31% de sable concassée** ($\rho_{abs} = 2.64$) et **46,49% de sable de dune** ($\rho_{abs} = 2.543$)
- SC= $493,11 \text{ Kg/m}^3$
- SD= $416,01 \text{ Kg/m}^3$
- Gravier : **40% de gravier 3/8** ($\rho_{abs} = 2.64$) et **60% gravier 8/16** ($\rho_{abs} = 2.67$)
- $M_{3/8} = 333,01 \text{ Kg/m}^3$
- $M_{8/16} = 505,22 \text{ Kg/m}^3$
- Super plastifiant = 16.32 L/m^3

Tableau III.25 composition d'un mètre cube de BAP formulé par la méthode LCPC

Constituants	Quantité	Unité
Sable concassée	493,11	Kg/m ³
Sable de dune	416,01	Kg/m ³
Gravier 3/8	333,01	Kg/m ³
Gravier 8/16	505,22	Kg/m ³
Ciment	400	Kg/m ³
Eau	154,89	Kg/m ³
Super plastifiant	16,32	Kg/m ³
filler de calcaire 10%	40	Kg/m ³

Par la suite, on a déterminé la formulation pour chaque composition, vue que la poudre de céramique est ajouté aux constituants de base en addition et non en substitution afin d'augmenter le volume de la pâte avec des dosages de 2%, 7%, et 14% de la masse de ciment.

Il est à noter que la formule de base contient déjà 10% de calcaire en addition.

Tableau III.26 composition d'un mètre cube de BAP 2% Céramique

Constituants	Quantité	Unité
Sable concassée	488,7432	Kg/m ³
Sable de dune	412,32	Kg/m ³
Gravier 3/8	330,0528	Kg/m ³
Gravier 8/16	500,7051	Kg/m ³
Ciment	400	Kg/m ³
Eau	157,7	Kg/m ³
Super plastifiant	16,62	Kg/m ³
filler de calcaire 10%	40	Kg/m ³
Céramique blanche	8	Kg/m ³

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

- Béton témoin avec 10% calcaire : quantité nécessaire de 0.036m³

Tableau III.27 Composition de béton témoin pour confection 36 l

Constituants	Quantité	Unité
Sable concassée	17,75	Kg/m ³
Sable de dune	14,97	Kg/m ³
Gravier 3/8	11,98	Kg/m ³
Gravier 8/16	18,18	Kg/m ³
Ciment	14,4	Kg/m ³
Eau	5,6772	Kg/m ³
Super plastifiant	0,58	Kg/m ³
filler de calcaire 10%	1,44	Kg/m ³

Composition de 36 l de béton formulé par la méthode LCPC

La quantité nécessaire pour confection 36 l de 0.036 m³ est

Tableau III.28 Composition des différents bétons pour confection 36 l en Kg

Constituant	BAP (2%PC)	BAP (7%PC)	BAP (14%PC)
Sable concassée	17,59	17,19	16,63
Sable de dune	14,84	14,50	14,03
Gravier 3/8	11,88	11,61	11,23
Gravier 8/16	18,02	17,61	17,04
Ciment	14,4	14,4	14,4
Eau	5 ,6772	5,931	6,2856
Super plastifiant	0,59	0,62	0 ,6624
calcaire 10%	1,44	1,44	1 ,44
Céramique	0,288	1,008	2,016

- **Préparation du sable**

Pour l'étude de l'influence du sable fin sur la performance d'un BAP : un dosage de sable fin concassé dont les dimensions inférieurs à 0,63 mm, utilisé séparément, est ajouté ou retranché de la masse du sable mixte (concassé et sable de dunes) et le remplacé par le même pourcentage du gros sable dont le diamètre au-delà de 0,63mm. Donc le sable est préparé comme suit :

Sable1 : faire ajouter 5% des deux fractions composées (2% de 315 µm et 3%de 160µm), en retranchant le même dosage de gros sable mixte.

Sable2 : faire le même travail avec 7% (3% de 315µm et 4% de 160µm)

Sable3 : faire retrancher 5% des deux fractions composées (2% de 315 µm et 3%de 160µm), en le remplaçant par le même dosage de gros sable mixte

Sable4 : comme le sable 3 avec 7% (3% de 315µm et 4% de 160µm) du sable concassé.

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

III.11Essais 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.

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP :

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

- **La procédure à suivre pour mettre en place un BAP est décrite comme suivant**

[NA EN 123906 -2]

- ✓ Introduire gravier 8/16, ciment, sable 0/5 et gravier 3/8.
- ✓ Malaxer pend 1 min et 30 secs.
- ✓ Introduire la quantité d'eau.

- ✓ Malaxer pendant 3 min et ajouter l'eau tout attentivement.
- ✓ Mesurer l'étalement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désiré et visé.

Donc : le temps total de malaxage est de 4 min et 30 secs.

III.11.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams [NF EN 12 350-8]

a-Objet d'étalement (slump flow) :

L'essai d'étalement ou slump flow est utilisé pour caractériser la fluidité du béton.

b-Matériel nécessaire :

- Plateau équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane (type table DIN)

Constituant un carré d'au moins 90 cm de cote

- Cône d'Abrams disposant d'un empattement a sa basse afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur.
- Mètre ou règle de 90 cm.

c-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 manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône
- Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesure (au centimètre le plus proche) le diamètre final (D final) sur deux cotés perpendiculaires.
- de plus de 5 cm, l'essai doit être invalide et reconduit.
- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenue, en arrondissant au centimètre supérieur. [26]



Figure III 10 Essai d'étalement

III.11. 2 Essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11]

a-Objet de l'essai :

L'essai de stabilité au tamis (figure 19) vise à qualifier les bétons vis-à-vis du risque de ségrégation.

b-Matériel nécessaire :

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

C-Mode opératoire :

- Echantillonnage :
- En laboratoire : Malaxer, verser directement 10 litres de béton dans le seau.
- Temps d'attente entre l'arrêt du malaxeur et le prélèvement <30s.
- Sur chantier, BPE amené par camion malaxeur : Malaxer à grande vitesse pendant 1minute.
- Remplir le seau avec 10 litres de béton directement depuis la goulotte du camion.
- Sur chantier avec centrale, mise en œuvre à la benne : Prélever 10 L de béton en tête de benne à la main écope pour remplir le seau.

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 tamis+fond sur la bascule.
- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuage a la surface du seau après les 15mn.
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4,8 kg - tolérance ± 0.2 kg ; verser ce béton au centre du tamis : hauteur de chute du béton de 50 cm ± 5 cm.
- Noter le poids réel lu de l'échantillon.
- Attendre 2 mn.
- Faire la tare.

Peser le fond avec la laitance :

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

D-Critères d'acceptabilité :

Les critères qui suivent sont particulièrement adaptés aux applications de béton auto plaçant en éléments verticaux. La mesure de pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton auto plaçant de la façon :

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

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



Figure III. 11- Stabilité au tamis

III.11.3 Essai de la boîte en [L NF EN 12 350-10]

a-Objet de boîte en L :

La boîte en L permet de tester la mobilité de béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.

b-Matériel nécessaire :

- La boîte en L
- Mètre

C- Mode opératoire :

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte en L à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm. 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 . Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.

A noter que les temps nécessaires pour des écoulements horizontaux respectifs de 20 cm et 40 cm (à matérialiser sur le fond de la boîte en L) peuvent être mesurés pour estimer la viscosité du béton. [12]



Figure III.12 : Essai capacité de remplissage

III.12 Essai Rhéomètre

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.



Figure III.13 : Essais rhéomètre

III.13 Confection des éprouvettes :

III.13.1 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).

III.13.2 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.14 Conservation des éprouvettes

III.14 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci (DT, NDT) :

a) LES ESSAIS DESTRUCTIFS :

III.14.1 Essai compression [NF EN206-1]

Le but est de déterminer la résistance à la compression du béton.

- L'essai se fait sur une éprouvette cubique 10x10x10 Cm
- La résistance est déterminée à 28 jours 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 de dureté par rebondissement (scléromètre) [NA EN 125042]

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.16 : 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 :

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

S : dureté au choc d'élément.

s_i : dureté de la zone de l'élément.

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

III.14.3 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.17. Appareil ultrason

III .5 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté un programme expérimental pour une caractérisation des matériaux utilisés pour la préparation du béton auto plaçant à base de deux additions minérales (calcaire et céramique blanche) en faisant changer la granulométrie du sable combiné de sable concassé et sable de dune.

Les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamad EL Bachir Elibrahimi.et, où on a détaillé les essais caractérisant un béton auto plaçant 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 sont décrits aussi.



CHAPITRE IV
RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CHAPITRE IV

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 Introduction

Le volume de la pâte dans un béton auto plaçant est très influent sur sa performance rhéologique et mécanique et ce par l'ajout des additions minérales, de surface spécifique de Blaine élevée, par rapport à celle du ciment, par contre le volume des agrégats est réduit.

Un programme expérimental est conçu afin d'étudier l'influence du dosage de ces additions ainsi que le sable fin sur cette performance et les résultats obtenus seront discutés dans ce qui suit.

IV.2 Différents BAP préparés et leur symboles

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

Tableau IV.0 les mélanges préparées avec avec leurs symboles

Mélange de BAP	Différents dosages utilisés
BAPT1	Béton témoin
BAPT2	+ 2% de poudre de céramique.
BAP T3	+ 7% de poudre de céramique.
BAP T4	+ 14% de poudre de céramique.
BAP 5S	+ 2% céramique et plus 5% de sable fin
BAP 6S	+ 2% céramique et moins 5% de sable fin
BAP 7S	+ 2% céramique et plus 7% de sable fin
BAP8S	+ 2% céramique et moins 7% de sable fin
BAP 9S	+ 7% céramique et plus 5% de sable fin
BAP 10S	+7% céramique et moins 5% de sable fin
BAP 11S	+7% céramique et plus 7% de sable fin
BAP 12S	+7% céramique et moins 7% de sable fin
BAP 13S	+14% céramique et plus 5% de sable fin
BAP 14S	+14% céramique et moins 5% sable fin
BAP 15S	+ 14% céramique et plus 7% de sable fin
BAP 16S	+ 14% céramique et moins 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.

IV.3.1 Les résultats à l'état frais

Les résultats sont représentés dans les tableaux suivant :

Tableau IV.1 Caractéristiques rhéologiques des BAP préparés

Type de béton	L'étalement (cm)	Stabilité de tamis (%)	Boite en L (h ₂ /h ₁)
BAP _{T1}	72,5	4,52	1
BAP _{T2}	70	2,3	1
BAP _{T3}	75,5	9,22	1
BAP _{T4}	75	13,46	1
BAP _{5S}	73	10,28	1
BAP _{6S}	70,5	0,724	1
BAP _{7S}	71,5	3,92	1
BAP _{8S}	72	3,14	1
BAP _{9S}	74	3,06	1
BAP _{10S}	71,5	4,58	1
BAP _{11S}	73	1,7	1
BAP _{12S}	71	7,62	1
BAP _{13S}	73	9,74	1
BAP _{14S}	75	6,36	1
BAP _{15S}	77	1,48	1
BAP _{16S}	74	8,5	1

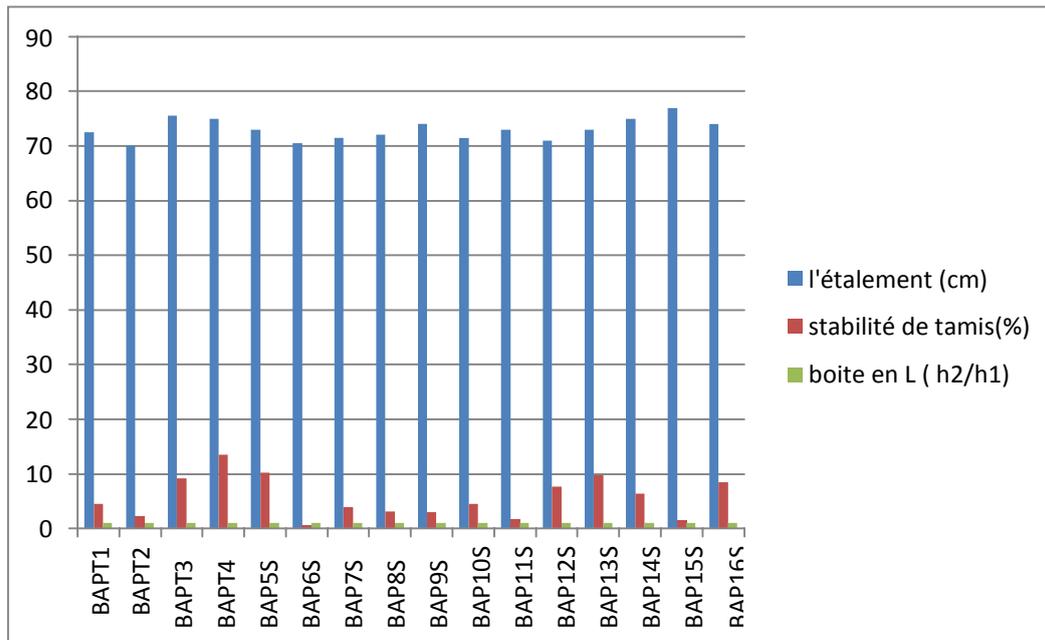


Figure IV.1 L'étalement, stabilité de tamis et l'essai de boite en L en fonction de type de béton

D'après le tableau IV.1 et la figure IV.1, on remarque que la capacité de remplissage pour les BAP est identique pour tous les mélanges (100%), $H_2/H_1 > 0.8$ (80%) et cela veut dire un bon écoulement.

Les étalements des bétons auto plaçant testés sont compris entre 70 cm et 77cm qui est associée au mélange BAP_{15S} qui est composé de (7%+) sable fine et 14% céramique.

La laitance est inférieure à 15 % selon le critère d'acceptabilité, la stabilité au tamis est considéré comme satisfaisante.

Tous nos bétons ont présenté une bonne stabilité au tamis, pas de ségrégation.

Les compositions des bétons auto plaçant donnent une grande fluidité sans ségrégation et sans ressuage qui constituent d'ailleurs ses spécificités.

Ces propriétés sont liées au rôle de la teneur en addition minérale et les fins de sable qui améliorent la granulométrie et la compacité des BAP, et aussi le rôle de super plastifiant qui a une action de défloculation et dispersion des grains du ciment d'où une diminution de frottement interne.

IV.3.2 Valeurs rhéométriques de Bingham

Les résultats d'écoulement déduit à partir d'un rhéomètre sont présentés dans les figures Figure IV.2 jusqu'à Figure IV.17

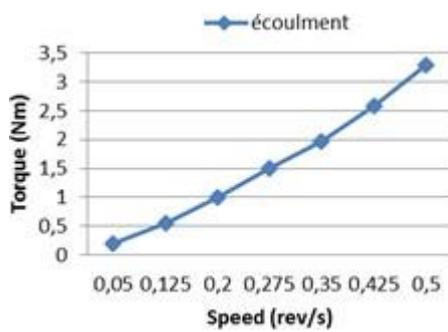


Figure IV.2 : Courbe d'écoulement des points de BAP_{T1}

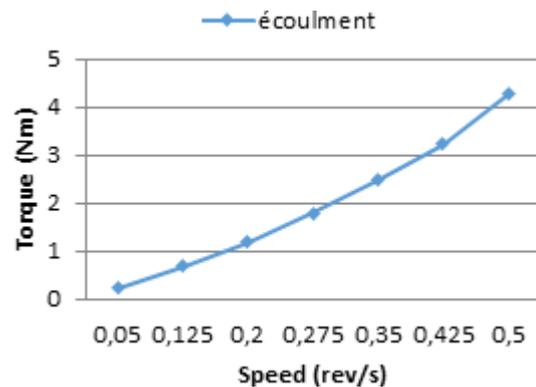


Figure IV.3 : Courbe d'écoulement des points de BAPT₂

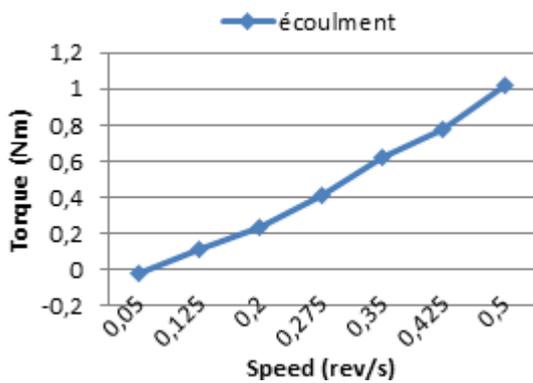


Figure IV.4 : Courbe d'écoulement des points de BAP_{5S}

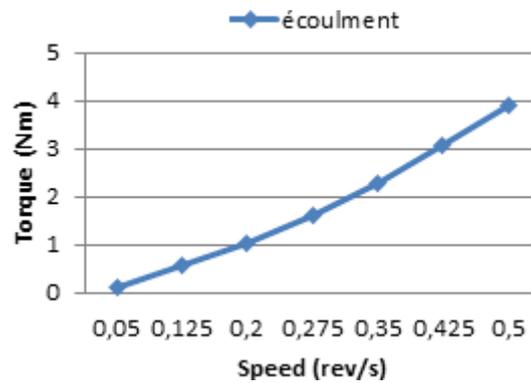


Figure IV.5 Courbe d'écoulement des points de BAP_{6S}

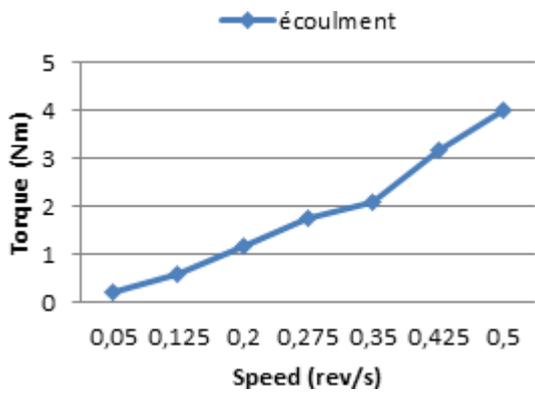


Figure IV.6 Courbe d'écoulement des points de BAP7S

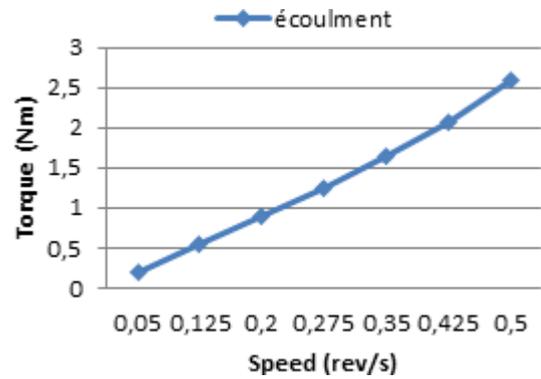


Figure IV.7 Courbe d'écoulement des points de BAP8S

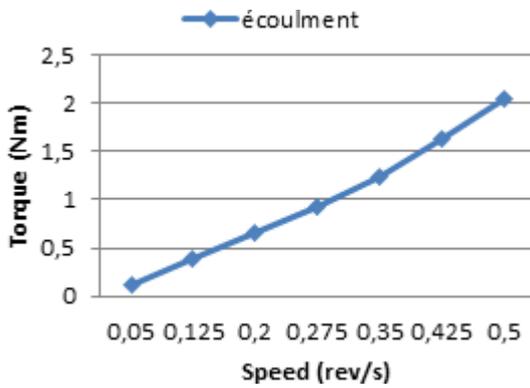


Figure IV.8 Courbe d'écoulement des points de BAPT3

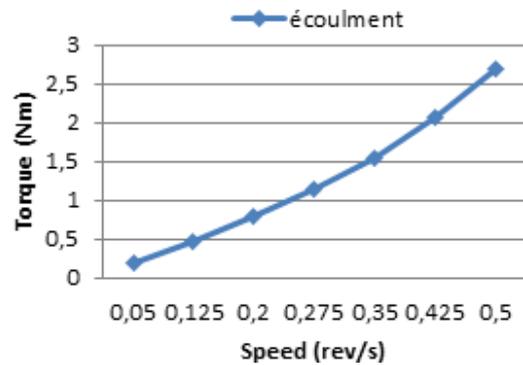


Figure IV.8 Courbe d'écoulement des points de BAP9S

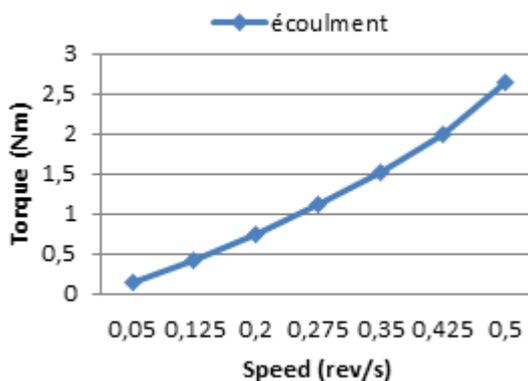


Figure IV.10 Courbe d'écoulement des points de BAP10S

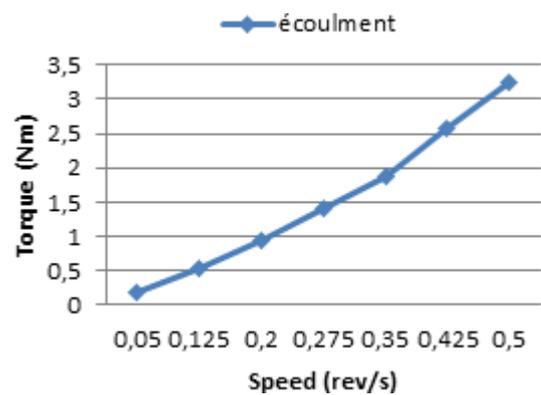


Figure IV.11 Courbe d'écoulement des points de BAP11S

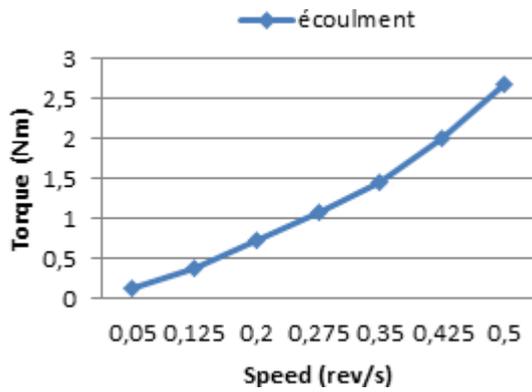


Figure IV.12 Courbe d'écoulement des points de BAP12S

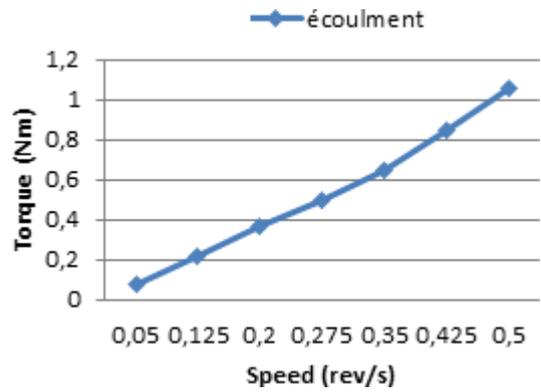


Figure IV.13 Courbe d'écoulement des points de BAPT4

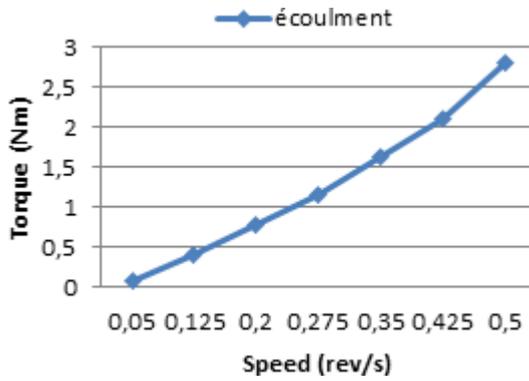


Figure IV.14 Courbe d'écoulement des points de BAP13S

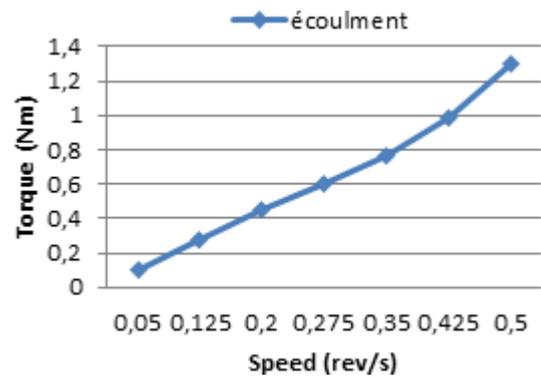


Figure IV.15 Courbe d'écoulement des points de BAP14S

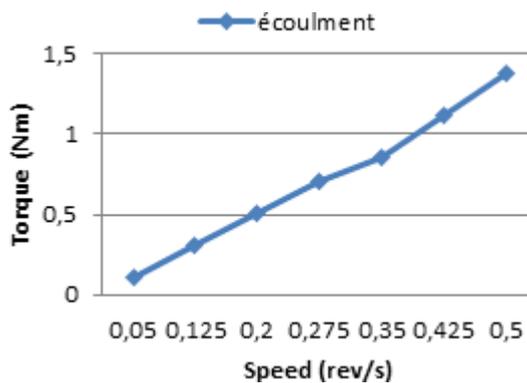


Figure IV.16 Courbe d'écoulement des points de BAP15S

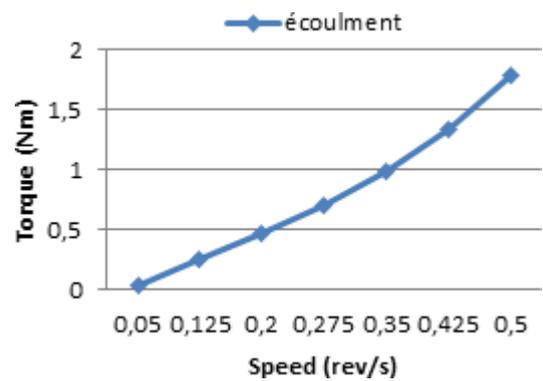
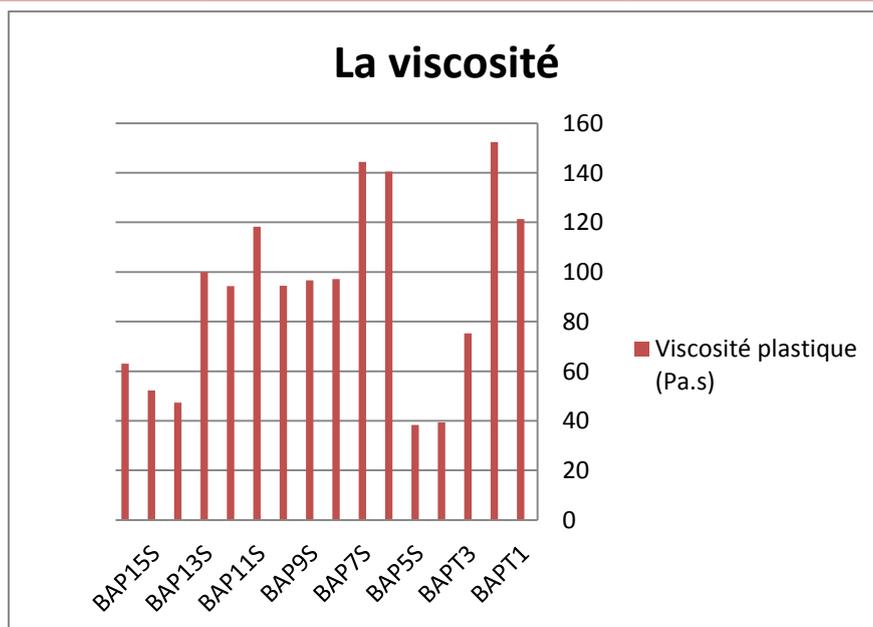


Figure IV.17 Courbe d'écoulement des points de BAP16S

Tableau IV.2 caractéristique rhéologiques des différents BAP mesurées par rhéomètre

Type de béton	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité plastique (Pa.s)
BAP _{T1}	0,1	121,3
BAP _{T2}	0,1	152,3
BAP _{T3}	0,1	75,3
BAP _{T4}	0,1	39,4
BAP _{5S}	0,1	38,34
BAP _{6S}	0,1	140,5
BAP _{7S}	0,1	144,36
BAP _{8S}	0,1	97,2
BAP _{9S}	0,1	96,6
BAP _{10S}	0,1	94,4
BAP _{11S}	0,1	118,2
BAP _{12S}	0,1	94,3
BAP _{13S}	0,1	100
BAP _{14S}	0,1	47,4
BAP _{15S}	0,1	52,2
BAP _{16S}	0,1	63

**Figure IV.18 .la viscosité des différents BAP**

Les tableaux et les figures ci-dessus présentent le comportement rhéologique d'un BAP avec la variation de sable fin et la poudre de la céramique et les fillers calcaire.

On a enregistré des seuils de cisaillement identiques pour tous les mélanges d'une valeur ne dépassant pas 0,1Pa.

Les valeurs de viscosité varie entre 38,34 Pa.s pour le mélange BAP5S (+2% céramique + 5% sable fin) et 144,36 Pa.s pour BAP7S (+2% céramique + 7% sable fin)

Les valeurs de viscosité les plus basses sont celles concernant les mélanges à base de 14% de céramique, à l'exception du mélange **BAP_{13S}** (14% céramique + 5% sable fin) qui a marqué une valeur élevée de 100 Pa.s et celle du mélange BAP5S.

Pour les autres mélanges, les valeurs de viscosité sont proches et relativement élevées.

On peut conclure que les mélanges étaient suffisamment fluides pour avoir un seuil de cisaillement aussi faible. La nature de sable et sa granulométrie ainsi la finesse des ajouts ont un effet sur et la viscosité du béton auto plaçant.

Le BAP doit avoir un seuil d'écoulement faible pour que l'écoulement s'amorce rapidement.

Ces propriétés sont liée 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. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton.

IV.4 Les résultats à l'état durci

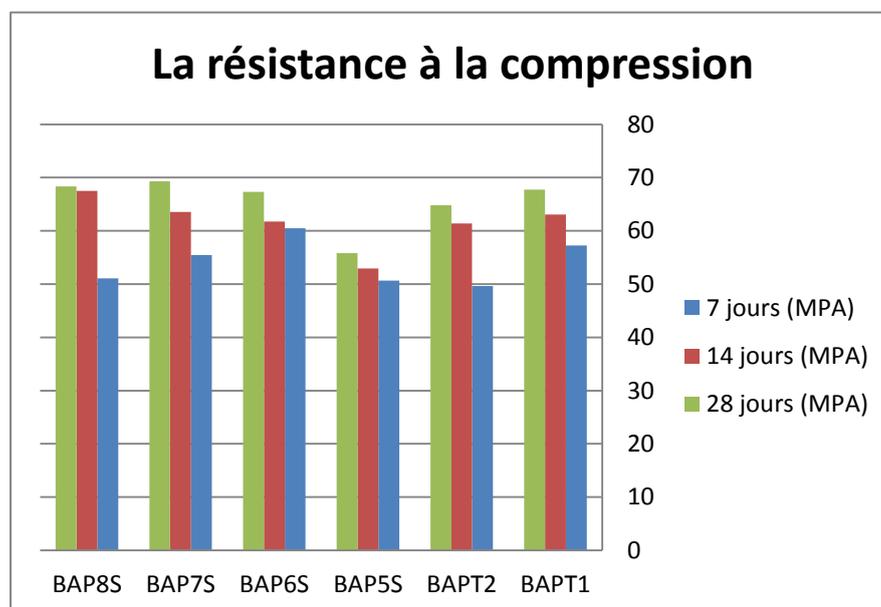
IV.4 .1 La résistance à la compression

L'essai de compression est l'essai le plus couramment pratique .il s'effectue sur des éprouvettes cubiques (10× 10× 10) durent les dates suivantes : 7 ,14 ,28 jours

Les tableaux suivants regroupent les différentes valeurs de la résistance à la compression pour chaque mélange et les comparer avec le béton de base **BAP_{T1}** (témoin).

Tableau IV.3 la résistance à la compression des mélanges à base de 2% céramique

Type de béton	7 jours (MPa)	14 jours (MPa)	28 jours (MPa)
BAP_{T1}	57,25	63 ,09	67,73
BAP_{T2}	49,67	61,37	64,80
BAP_{5S}	50,64	52,96	55,82
BAP_{6S}	60,51	61,76	67,35
BAP_{7S}	55,45	63,54	69,29
BAP_{8S}	51,091	67,524	68 ,36

*Figure IV.19. Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du BAP à base de 2% de céramique*

D'après les résultats mentionnés dans le tableau et la figure ci-dessus on remarque des valeurs très proches entre elles de la résistance à la compression à l'exception du mélange **BAP_{5S}** où les valeurs pour différents âges sont moins améliorées mais qui reste un bon résultat par rapport à un béton ordinaire. Une augmentation importante de la résistance à la compression de l'ordre de 24 ,33% dans le **BAP_{8S}** à l'âge de 14 jours.

À l'âge de 28 jours on remarque une augmentation importante de la résistance à la compression de l'ordre de 8,29% dans le **BAP_{7S}**.

Donc on peut constater que la granulométrie du sable qui influe sur la compacité du béton vue le rôle que joue le sable et la surface spécifique de Blain jouent un rôle important dans la performance mécanique des bétons auto plaçant.

IV.4 la résistance à la compression de BAP à base de 7% céramique

Type de béton	7 jours (MPa)	14 jours (MPa)	28 jours (MPa)
BAP _{T1}	57,25	63,09	67,73
BAP _{T3}	52,35	58,24	61,72
BAP _{9S}	55,108	58,68	70,68
BAP _{10S}	55,28	60,61	72,47
BAP _{11S}	55,57	60,97	73,25
BAP _{12S}	53,37	56,147	66,84

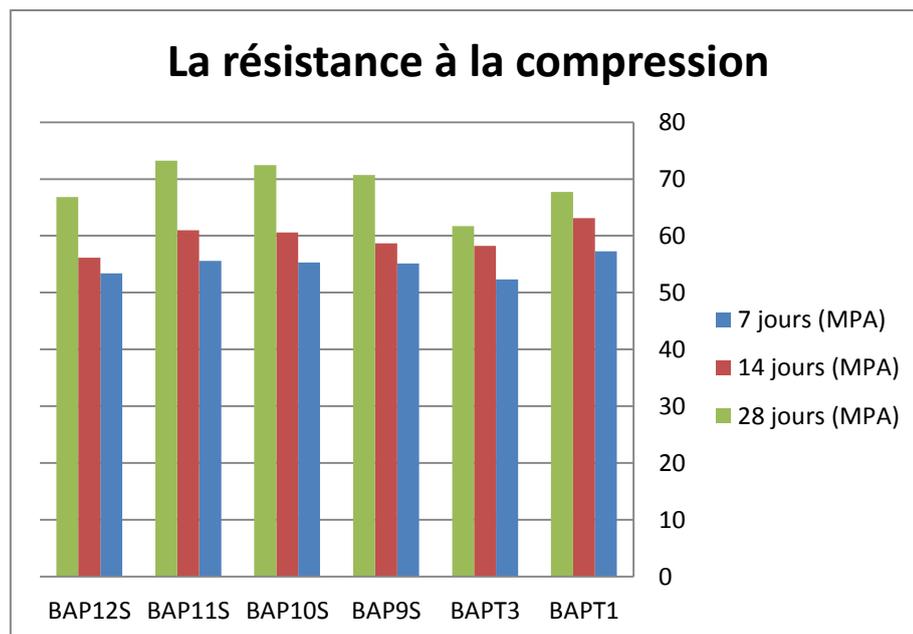


Figure IV.20. Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du BAP à base de 7% de céramique

D'après les résultats mentionnés dans le tableau et la figure ci-dessus on remarque que les résultats sont relativement proches.

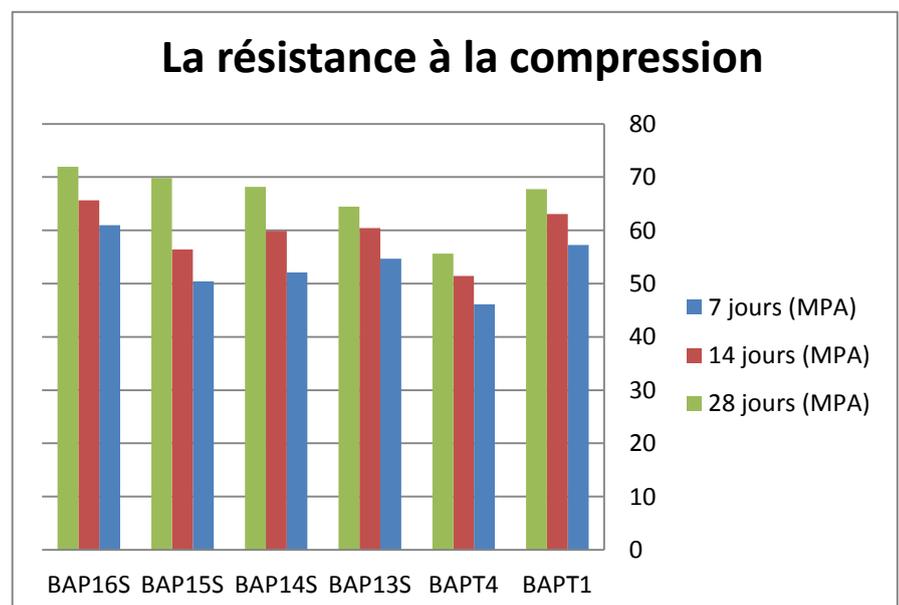
A l'âge de 28 jours, on remarque une augmentation importante de la résistance à la compression de l'ordre de 16,76 % dans les mélanges BAP9S, BAP10S et **BAP11S**.

On trouve une différence de la résistance à la compression de l'ordre de 8,75% entre **BAP11S** contenant de (7% poudre de céramique et 7% (+) de sable fin) et **BAP12S** contenant de (7% poudre de céramique et 7%(-) de sable fin) à cause de la granulométrie du sable qui peut entraîner une porosité : On a utilisée un sable concassée de l'ordre de 76% des fractions gros (supérieure de 0,315 mm).

IV.5 la résistance à la compression de BAP à base de 14% céramique

type de béton	7 jours (MPA)	14 jours (MPA)	28 jours (MPA)
BAP _{T1}	57,25	63,09	67,73
BAP _{T4}	46,12	51,44	55,61
BAP _{13S}	54,67	60,44	64,44
BAP _{14S}	52,10	59,92	68,17
BAP _{15S}	50,41	56,43	69,87
BAP _{16S}	60,95	65,64	71,95

Figure IV.21.
Évolutions de la résistance à la compression en fonction de l'âge du BAP à base de 14% de céramique



D'après les résultats mentionnés dans le tableau et la figure ci-dessus on marque une convergence entre les différentes valeurs sauf pour le mélange **BAP_{16S}** où on a enregistré une augmentation de l'ordre de 19,23% de la résistance à la compression pour les trois âges par rapport au témoin.

Il est à noter que les valeurs à la compression ont diminué par rapport au béton de base **BAP_{T1}** mélanges **BAP_{T2}**, **BAP_{T3}** peut être due de l'introduction des différents pourcentages de poudre de céramique qui a une surface spécifique de Blain inférieure à celle du calcaire.

IV.4.2 Les résultats d'ultrasons et scléromètre

A) Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des **BAP2%PC** étudiés à 28 jours.

*Tableau .IV6 Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des **BAP2%PC** étudiés à 28 jours*

Résultats des essais non destructifs Ultrason (V) et scléromètre (Is) des BAP2%PC étudiés à 28 jours.				
Type de béton	I_s	R_s(MPa)	V (Km.s⁻¹)	Ru (MPa)
BAP_{T1}	45,33	64,21	4,78	41,52
BAP_{T2}	44,33	61,38	4,81	42,78
BAP_{5S}	39,57	48,93	4,76	40,69
BAP_{6S}	45,71	65,29	4,90	46,83
BAP_{7S}	46,66	68,03	4,63	35,71
BAP_{8S}	45,88	65,78	4,961	49,79

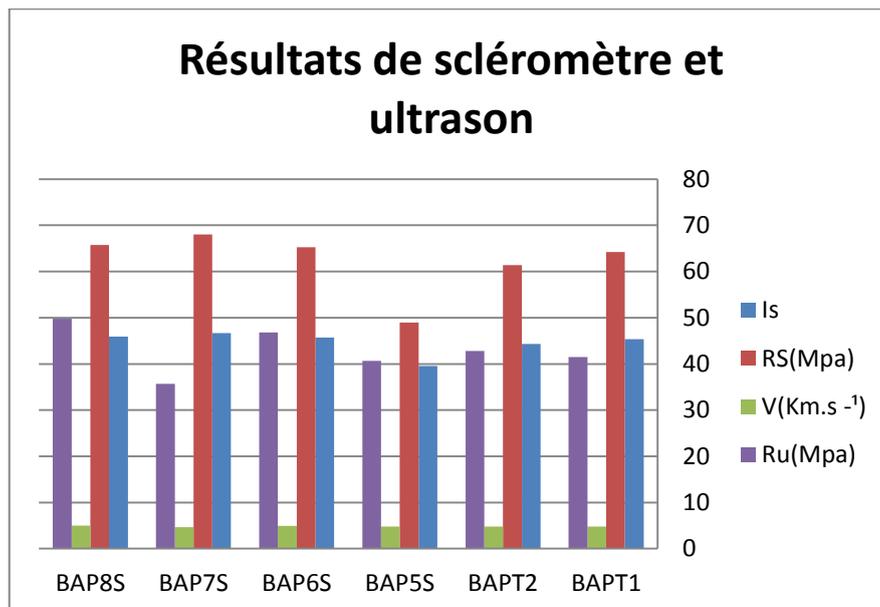


Figure I.V.22: Evaluation de la résistance à 28j avec essais non destructifs pour les BAP 2%PC

D'après les résultats mentionnés dans le tableau et la figure ci-dessus on trouve une différence entre de la résistance R_S (scléromètre) et R_u (ultrason) de l'ordre de 47,50% dans le BAP_{7S} .

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

Tableau .IV.7 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 ⁻¹)	R_u (MPa)
BAP_{T1}	45,33	64,21	4,78	41,52
BAP_{T3}	43,7	59,67	4,89	46,36
BAP_{9S}	44,14	60,88	4,84	44,09
BAP_{10S}	44,33	61,41	4,77	41,10
BAP_{11S}	46,5	67,57	4,88	45,90
BAP_{12S}	43,14	58,15	4,90	46,83

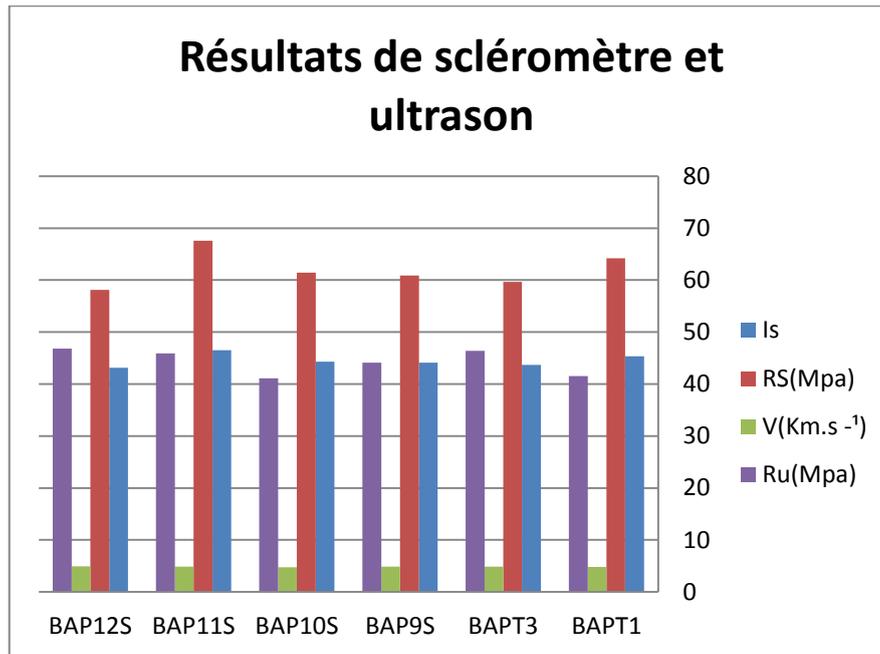


Figure IV.23 : Evaluation de la résistance à 28j avec essais non destructifs pour les BAP 7%PC

D'après les résultats mentionnés dans le tableau et la figure ci-dessus on trouve une différence entre de la résistance R_S (scléromètre) et R_u (ultrason) de l'ordre de 35, 33 % dans le BAP_{T1}

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

Tableau .IV.8 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 (Km.s ⁻¹)	Ru (MPa)
BAP_{T1}	45,33	64,21	4,78	41,52
BAP_{T4}	38,71	46,82	4,87	45,44
BAP_{13S}	44	60,50	4,96	49,74
BAP_{14S}	38	45,125	4,84	44 ,09
BAP_{15S}	41,71	54,36	4,76	40,69
BAP_{16S}	46,57	67,77	4,93	48,26

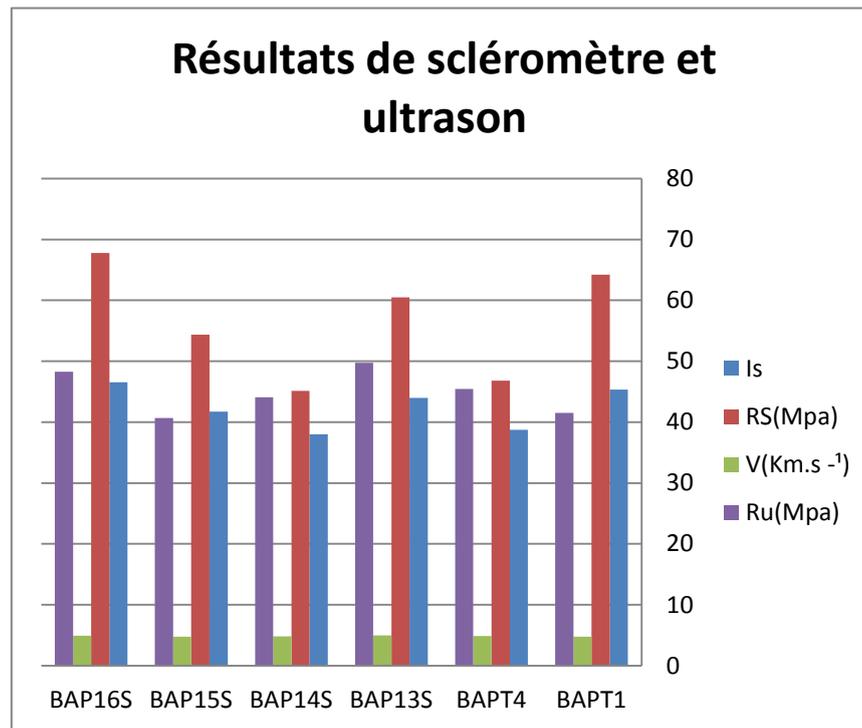


Figure IV.24 : Evaluation de la résistance à 28j avec essais non destructifs pour les BAP14%PC

D'après les résultats mentionnés dans le tableau et la figure ci-dessus on trouve une différence entre de la résistance R_S (scléromètre) et R_u (ultrason) de l'ordre de 35, 33 % dans le BAP_{T1} .

On a pu conclure ce qui suit

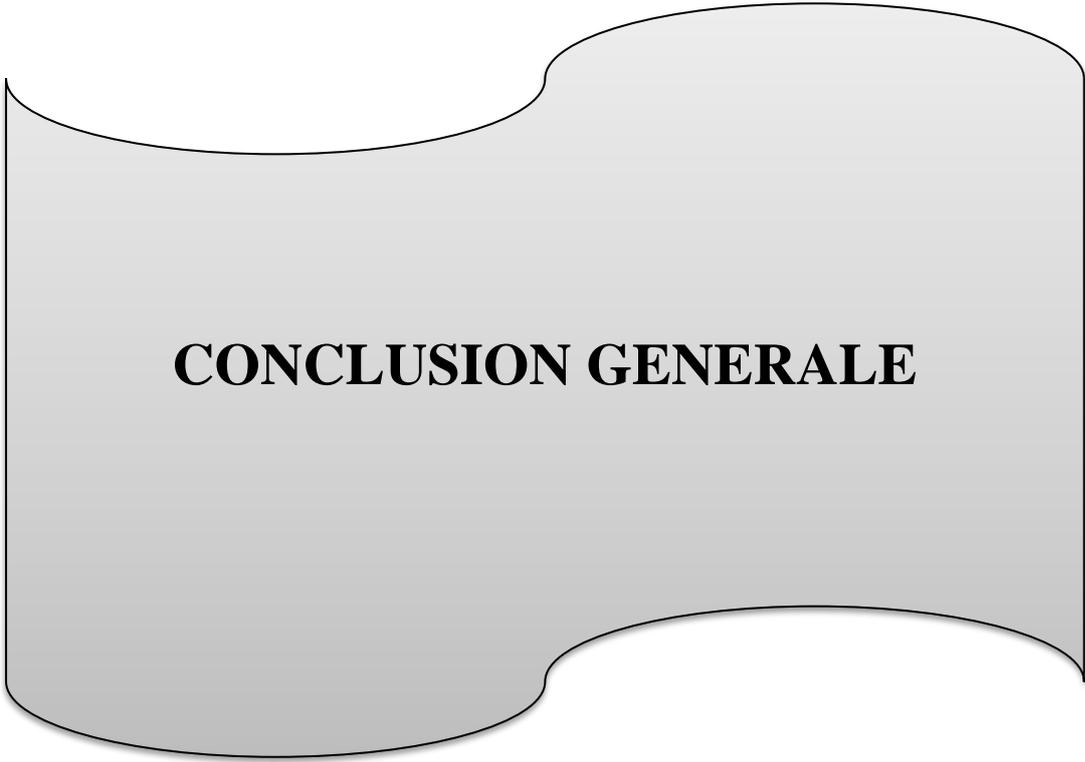
L'évaluation du béton nécessite d'appréhender les paramètres qui influencent les procédures et mesures de contrôle.

L'utilisation de la vitesse ultrasonore ou du rebond comme seule mesure de CND 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.

IV.5 Conclusion

Les résultats des différents essais ont montré que la nature, la granulométrie de sable et le taux de dosage d'ajout ainsi la surface spécifique de Blain jouent un rôle important sur le comportement rhéologique et l'amélioration des propriétés mécaniques du béton auto plaçant.



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

A la lumière de cette étude qui concerne l'influence de la nature du sable et sa granulométrie ainsi que les additions minérales, qui peuvent atteindre 24% de la masse du ciment, sur la rhéologie et la réponse mécanique des BAP, on peut faire les constatations 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 70 à 77 cm.
- ✚ Les mêmes formules des bétons donnent des taux de remplissages acceptable dans les milieux confinés ($H_2/H_1 > 0.8$), 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 ($P < 15\%$).
- ✚ L'augmentation ou la diminution 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 concassé et celui de dune utilisés sur la performance des BAP.
- ✚ On remarque aussi que l'accroissement de la teneur en additions minérales conduit d'un coté à une diminution de la résistance à la compression par rapport au béton à base de 14% calcaire seul, mais qui restent des valeurs importantes par rapport à un béton ordinaire; et d'autre coté , au contraire l'addition a conduit à une augmentation surtout en faisant changer la granulométrie du sable concassé utilisé. Ce résultat s'explique, peut-être, à une réaction combinée entre un dosage bien précis d'additions et granulométrie des sables utilisés ;
- ✚ Les ajouts minéraux et la granulométrie du sable en variation associée, joue un rôle important dans l'amélioration des caractéristiques rhéologiques et les propriétés mécaniques du béton auto plaçant ;
- ✚ Le meilleur résultat était celui de l'addition de 7% de poudre de céramique et +7% de sable fin où la résistance à 28jours jusqu'à atteint 73 ,25 MPA
- ✚ Vue qu'en parallèle à ce travail, une autre étude semblable à celle-ci, à base de calcaire et céramique blanche (mais avec des compositions chimiques différentes), avec la même démarche a donné des résultats différents concernant la réponse mécanique et la

viscosité et c'est peut-être dû à la différence des constituants chimiques ainsi que la nature du sable utilisé (sable concassé + sable de dune pour cette étude et sable de dune seul pour l'autre).

Etat durci :

- ✚ L'utilisation de 7% de poudre de céramique et 10% filler de calcaire avec les différents dosage du sable fin peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique.

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

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.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] OKAMURA.H.OZAWA, 1994, Self compacting concrete journal of Advanced concrete technology]
- [2] OKAMURA. H., OZAWA, K. (1994), "Self compactable high performance concrete in Japan" ACI International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok, Thailand, d'après ; Novembre 1996 ;
- [3]MERNIZ MOHAMED«Étude de l'influence de la nature et les dimensions des fibres sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants (BAP) ", thèse de magister Jan 2014
- [4] KASMI ZIN EDDINE, «Propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons autoplaçant fibrés exposés à haute température", thèse de magister Jan 2014
- [5]-Petersson.O, Billberg .P,"Investigation on blocking of self-compacting with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler», Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 333-344, 1999.
- [6]-Billberg.P, "Self-compacting concrete for civil engineering structures –the Swedish experience", Report 2: 99, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1999.
- [7]-Projet National de Recherche CERIB, " béton autoplaçant BAP " France, Octobre2001
- [8]-Turcry.P, " Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation", Thèse doctorale, université de Nantes, 2004.
- [9]-Turcry.P, Loukili. A,"Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants : incidence sur les caractéristiques rhéologiques", Forum des associations AFGC/AUGC/IREX : innovation et développement en génie civil et urbain
- [10] Hanaa Fares. Thèse de doctorat en Génie Civil «Propriétés mécaniques et physicochimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée», Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise, le 07 Décembre 2009
- [11] S. Assie & G. Escadeillas & G. Marchese, « Durability of Self-Compacting», Proceedings de Concrete 3rd international symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland 2003
- [12]Association française de génie civil, "Bêtons auto-plaçants–Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.
- [13] Diederich, P., Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton, Thèse de doctorat, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010.

- [14] Skarendahl.A, Petersson.O, "Self-Compacting Concrete: State-of-the-artreport of RILEM Technical Commite 174-SCC", RILEM Publications, France, 2001.
- [15] Bezzi Tiziri, Souidi Fatiha, Chelouah Nacer, Influence de l'ajout d'une argile locale, cuite et broyée, sur la résistance a la compression et le retrait d'un béton autoplaçants, Université Abderahmane MIRA, Béjaia, Algérie,
- [16] MAHER EL BARRAK, thèse de doctorat contribution à l'étude de l'aptitude ç l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 12 juillet 2005.
- [17] Collection Technique CIM béton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre 2006.
- [18] Mohammed el amin bouakkaz mémoire magister en génie civil «caracterisation du béton par les méthodes non destructives–application de la méthode de fréquence de resonance» universite abou bekr belkaid–tlemcen, le 28/06/2012.
- [19] Persoz B. Introduction à l'étude de la rhéologie. Paris, Dunod, 1960; 271p.
- [20] Beaupré D. Rheology of High Performance Shotcrete. PhD thesis, University of British Columbia, Canada, 1994; 265p.
- [21] Couarraze G, Grossiord JL. Initiation à la rhéologie. 3ème edition, 2000; 300p.
- [22] Poitou A and Racineux G. A squeezing experiment showing binder migration in concentrated suspension. Journal of Rheology, 2001; V 45, pp:609-625.
- [23] De-larrard F, Belloc A. L'influence du granulats sur la résistance à la compression des bétons. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, 1999; V 219, pp:41-52.
- [24] Crepault et Etienne, rhéologie des bétons frais a base de ciment d'aluminates de calcium, Québec: faculté des études supérieures et post doctorales de l'université Laval, 2012.
- [25] Papo.A, Rhéological models for cement pastes, 1998.
- [26] Tattersall GH and Bloomer SJ. Further development of the two-point test for workability and extension of its range. Magazine of Concrete Research, 1979; V31, pp:202-210.
- [27] Wallevik OH. Rheology a scientific approach to develop self-compacting concrete. In Proceedings of international RILEM Symposium on Self- Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, 2003; V 33, pp:23-32.
- [28] Coussot P. Rhéologie des boues et laves torrentielles - Etudes de dispersions et suspensions concentrées. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, et Etudes du Cemagref, 1993; 182p.

[29] Hu C, De Larrard F, Sedran T, Boulay C, Bosc F, Defiorenne F. Validation of btrheom, the new rheometer for soft-to-fluid concrete. *Materials and Structures*, 1996; V 29, pp:620-631.