

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu dieu miséricordieux qui m'a donné la force, le courage et la volonté d'achever cette modeste réalisation.

Je remercie tout t'abord mes deux encadreurs monsieur **BOUGLADA Med SALAH** d'avoir accepté encadré ce mémoire et d'honorer par leur Présence et disponibilité, Madame **TABET SOUAD** pour m'avoir dirigé et pour leur aide très précieuse.

Je Voudrais remercier Mr **Noui Ammar** ses précieux conseils, sa compréhension, et son aide inestimable. Qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude et de mon profond respect.

Je tiens à remercier aussi tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à L'aboutissement de ce mémoire:

- Chef département Mr **LOGZIT** ;
- Monsieur **ACHOUR YACINE**;
- Monsieur **KESSAL OSSAMA**;
- Les responsables de laboratoire de génie civil Mr farid, Melle fatiha, Mr zoubir;
- Mes collègues;

J'adresse mes remerciements à tous ceux qui m'ont soutenu, de près ou de loin, pour la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à...

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie puisse dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conciles, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon frère et Ma sœur, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Pour un person très cher qu'il m'aide pour faire ce travail, Merci pour sa disponibilité son soutien à tous les moments difficiles de ma vie, et pour son aide.

Une dédicace très spéciale pour mes Amies, et surtout *FATIMA* et *KHALIDA*.

A Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour réaliser Ce travail.

Toute ma grande famille : Bengrine et Dendani

Nadjet

sommaire

Introduction générale:.....	I
Problematique:	I
Structure du mémoire:	II

CHAPITRE I

REVUE GENERALE SUR LE BETON AUTOPLAÇANT

I.1. Introduction:.....	1
I.2. Historique et développement de BAP:.....	1
I.3. Définition:	3
I.4. Les avantages des bétons autoplaçants:	3
I.4.1. Les avantages techniques:.....	3
I.4.2 Les avantages socio-économiques:	3
I.4.3 Les Avantages écologiques:.....	3
I.5 Concept du béton autoplaçant:.....	4
I.6 Les Constituants d'un BAP:.....	5
1.6.1 Ciment et eau:.....	5
1.6.1.1 Ciment:	5
1.6.1.2 Eau:.....	6
1.6.2 Granulats:	7
1.6.2.1 Le Rôle des granulats:	7
1.6.3 Les Additions minérales:.....	7
1.6.3.1 Les avantages des addition minérale:	8
1.6.4 Utilisation des adjuvants:	8
1.6.4.1 Superplastifiants:	8
1.6.4.2 Les différentes classes:	9
1.6.4.3 Mode d'action des superplastifiants:	9
1.6.4.4 .Influence des superplastifiants sur l'Écoulement du bÉton:.....	10
I.7 PROPRIÉTÉS DU BÉTON FLUIDE (BAP) A L'ÉTAT FRAIS.....	12
1.7.1 Capacité au remplissage	12
1.7.2. Résistance à la ségrégation:.....	13
1.7.3. Capacité de passage:.....	13
I.8. PROPRIÉTÉS DU BÉTON FLUIDE (BAP) A L'ÉTAT DURCI.....	14
1.8.1. Propriétés mécaniques :.....	14
1.8.3 Module d'élasticité :	15

1.8.4. Retrait :	15
1.8.5. Déformation sous charge (fluage) :	16
1.8.6. Propriétés physicochimiques et durabilité.....	17
1.9 Les Approches de formulation:	18
1.9.1 Différentes types des méthodes:.....	18
1.9.1.1. Méthode japonaise :	18
1.9.1.2 Méthode Suédoise: proposée par [Pettersson et al, 1996] :	19
1.9.1.3 Méthode Française:	19
1.9.1.4 Autres Méthodes:.....	20
1.9.2 Comparaisons des approches:.....	20
1.10 Fabrication des Bétons Autoplaçants:	22
1.11 Contrôle des Bétons Autoplaçants.....	22
1.11.1. La mesure d'étalement au cône d'Abrams [NF EN 12350-8] :	22
1.11.2. L'essai de la boîte en L [NF EN 12350-10]:	23
1.11.3 L'essai de stabilité au Tamis [NF EN 12350-11].....	24
1.12. Transports des BAP:.....	25
1.13. Mise en place des BAP:.....	25
1.14 Domaine d'utilisation des BAP:	26
I.15 Conclusion:	27

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS SUR LES AJOUTS

II.1 Introduction:	28
II.2 Définition:.....	28
II.3 Classification des ajouts minéraux:	29
II.4 L'interet de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil:.....	30
II.4.1 Intérêt du point de vue technique:.....	30
II.4.2 Intérêt du point de vue économique:.....	30
II.4.3 Intérêt du point de vue environnemental:	30
II.5 Les inconvenient d'utilisation des ajouts minéraux:.....	30
II.6 les différents types d'ajouts:	31
II.6.1 calcaire:.....	31
II.6.1.1 L'influence sur les caractéristiques des betons frais:	32
II.6.1.2 L'influence sur les caractéristiques des bétons durcis:.....	32
II.6.2 Le laitier de haut fourneau (NF P 18-506):.....	32

II.6.2.1 L'influence sur les caractéristiques des bétons frais:	33
II.6.2.2 L'influence sur les caractéristiques des bétons durcis:.....	33
II.6.3 La poudre de verre:	34
II.6.3.1 L'influence sur les caractéristiques des bétons frais:	34
II.6.3.2 L'influence sur les caractéristiques des bétons durci:	34
II.7 L'utilisation des ajouts en Algérie	34
II.8 Conclusion:	35

CHAPITRE III

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

III.1 Introduction :.....	37
III.2 Matériaux utilisés :.....	37
III.3 Caractéristiques du sable utilise :.....	37
III.3.1 analyse granulométrique : (NF P 18 304)	37
III.3.1.1 Matériel pour l'analyse granulométrique :	37
III.3.1.2 Mode opératoire:.....	38
III.3.1.3 module de finesse (NF P 18-540):.....	39
III.3.2 Equivalent de sable:	39
III.3.2.1 Mode opératoire:.....	40
III.3.2.2 Interpretation des résultats:.....	41
III.4 Masse volumique du sable:.....	42
III.4.1 Masse volumique apparente:	42
III.4.2 la Masse volumique absolue (spécifique):	42
III.5 Porosité et compacité et indice des vides: NF P- 554.....	42
III.6 caractéristiques des graviers:	43
III.6.1 Analyse granulométrique (NF P 18-560):.....	43
III.6.2. la masse volumique:	45
III.6.3 Compacité, Porosité et l'indice de vide: NF P 18-554.....	46
III.7. caractéristiques du ciment:.....	46
III.7.1 présentation du ciment CPJ:.....	46
III.7.2 Domaine d'utilisation:	47
III.7.3 Analyses et caractérisation:	47
III.8 caractéristiques des ajouts:.....	48
III.8.1 le laitier:.....	48

III.8.2 calcaire:	48
III.9 le verre:	49
III.10.Les Adjuvants:	50
III.10.1 Description:	50
III.10.2 Caractéristiques:	50
III.10.3 Propriétés:.....	51
III.11 l'eau de gâchage:.....	51
III.12 Formulation du béton autoplaçant:	52
III.13 Méthodes d'essais:	54
III.13.1les Essais effectués sur la pate frais:	54
III.13.1.1 Essai d'étalement au mini-cône	54
III.13.2 Procédure de fabrication des éprouvettes:.....	55
III.13.3 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais:.....	56
III.13.3.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams NF EN 12 350-8:.....	56
III.13.3.2 Essai de la boîte en L (L-Box):.....	57
III.13.3.3 Essai de stabilité au tamis:.....	58
III.14 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci:	59
III.14.1 Essai compression NF EN 206-1:	59
III.13.1.1 Principe de l'essai:	59
III.14.1.2 Conduite de l'essai:	60
III.14.2 Essais traction par flexion: NF P 18-408	60
III.15.le milieux agressif :.....	61
III.16. Conclusion:	62

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Introduction:	64
IV.2 détermination du dosage en superplastifiant.....	64
IV.3 Le béton autoplaçant à l'état frais:	65
IV.3.1 différents BAP à base d'ajout (pourcentages de 5%):.....	65
IV.3.2 différents BAP à base d'ajout (pourcentages de 10%):.....	66
IV.4 Le béton autoplaçant à l'état durci:	67
IV.4.1 la résistance à la compression (NF P 15-471):.....	67
IV.4.1.1 Effet de laitier:.....	67
IV.4.1.2Effet de calcaire:.....	68
IV.4.1.3 Effet de verre:	70

IV.4.2 la résistance à la traction:	72
IV.5 milieu agressif:.....	75
IV.5.1 la chute de résistance.....	75
IV.5.2 la perte de masse.....	77
IV. 6 Conclusion:	79
Conclusion générale.....	80
Perspectives.....	81

**LES LISTES DES
FIGURES ET DES
TABLEAUX**

Chapitre 1

Figure 1.1. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP à l'état frais .	7
Figure I-2- Effet du super plastifiant sur les grains de ciment par le phénomène de dispersion	12
Figure 1.3. Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures.	16
Figure 1.4: malaxeur a béton	25
Figure 1.5: essai de boîte en L	27
Figure I-6: Essai de stabilité au Tamis	27
Figure I- 7: Le pont Akashi Kkaikyo	29
Figure I-: La tour Landmark Tower	30

Chapitre II

Figure II.1:les ajouts de gouhe à droite:calcaire, laitier, verre.	31
Figure II-2: Illustration de l'effet filler	33
Figure II.3: Structure du laitier	35

Chapitre III

Figure III-1: Matériels pour l'analyse granulométrique	38
Figure III.2: analyse granulometrique du sable OUAD SOUF	39
Figure III.3: courbe granulométrique des granulats concassés (3/8), (8/16).	44
Figure III.4: laitier de haut fourneau forme de poudre	48
Figure III.5: calcaire	49
Figure III.6: poudre de verre	50
Figure III.7: le super plastifiant MEDAFLOW 30	50
Figure III.8: Essai d'étalement au mini-cône	55
Figure III.10: Malaxeur à béton laboratoire des (MDC).	56
Figure III.11: Essais d'étalement	57
Figure III.12: la boîte en L	58
FigureIII.13: Essai Stabilité au tamis exécutés au laboratoire	59
FigureIII.15 : Essai de flexion en trois points	61
Figure III.16: solution acide HCl	62

Chapitre IV

Figure IV-1: la variation du diamètre d'étalement (mini cône), en fonction du dosage en SP.	63
Figure IV-2: Caractéristiques rhéologiques du différent BAP avec 5% ajout	65
Figure IV-3: Caractéristiques rhéologiques du différent BAP avec 10% ajout	65

Liste des figures

Figure IV-4: variation de la résistance à la compression des différents âges du BAP en fonction du pourcentage (5%,10%) de laitier	67
Figure IV-5: variation de la résistance à la compression des différents âges du BAP en fonction du pourcentage (5%,10%) de calcaire	68
Figure IV-6: variation de la résistance à la compression des différents âges du BAP en fonction du pourcentage (5%,10%) de verre	69
Figure IV-7: Résistance à la compression des différents BAP à différents âges étudiés avec 5% ajouts	70
Figure IV-8: Résistance à la compression des différents BAP à différents âges étudiés avec 10% ajouts.....	71
Figure IV-9: Résistance à la traction des différents BAP à différents âges étudiés avec 10% ajouts.....	72
Figure IV-10: Résistance à la traction des différents BAP étudié avec 10% ajout	73
Figure IV-11 : la chute de résistance à la compression des différents bétons étudiés avec 5% d'ajouts.....	74
Figure IV-12 : variation de chute de résistance à la compression des différents âges de BAP en fonction du pourcentage d'ajouts 10%.....	75
Figure IV-13 : variation de perte de masse des différents âges de BAP étudiés en fonction de pourcentage d'ajouts 5%.....	76
Figure IV-14 : la perte de masse des différents BAP étudiés avec 10% d'ajouts.....	77

Chapitre I

Tableau I.1: Paramètres de formulation des méthodes de formulation.....	24
Tableau I- 2: classes d'étalement	26
Tableau I-3: classe l'aptitude à l'écoulement	27
Tableau I- 4: Classes de résistance à la ségrégation - essai de stabilité	28

Chapitre II

Tableau II.1: Classification des ajouts selon leur réactivité.	31
---	----

Chapitre III

Tableau III.1: Analyse granulométrique du sable.....	38
Tableau III.1: classification des sables en fonction du module de finesse	39
Tableau III.2: La classification de la nature sable en fonction d'E.S.....	41
Tableau III.4: caractéristiques physiques du sable (OUAD SOUF)	43
Tableau III.5 Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	43
Tableau III.7: la masse volumique apparente des graviers:	45
Tableau III.8: la masse volumique absolue des graviers:	46
Tableau III.9: Porosité, Compacité, L'indice des vides E	46
Tableau III.10: Composition chimique et minéralogique du ciment (cpj).....	47
Tableau III.11: caractéristiques physique du ciment utilisé.....	47
Tableau III.12: Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode LCPC.....	53
Tableau III.13: Composition des différents béton pour confectionner 9 éprouvettes cubiques en Kg.....	54

Chapitre IV

Tableau IV-1: variation de diamètre en fonction du dosage en SP.....	63
Tableau IV-2 : Caractéristiques rhéologiques du défirant BAP avec 5% d'ajout.....	64
Tableau IV-3 : Caractéristiques rhéologiques du diffèrent BAP avec 10% d'ajout.....	65
Tableau IV-4: la résistance à la compression du BAP avec aitier	67
Tableau IV-5: la résistance à la compression du BAP avec filler calcaire	68
Tableau IV-6: la résistance à la compression du BAP avec le verre	69
Tableau IV-7: la résistance à la traction des différents BAP avec 5% ajout	72
Tableau IV-8: la résistance à la traction des différents BAP avec 10% ajout	73
Tableau IV-9: la chute de résistance des différents bétons à différents âges avec 5% ajouts.....	74

Liste des tableaux

Tableau IV-10 : la chute de résistance à la compression des différent BAP avec 10% ajouts.....	75
Tableau IV-11 : la perte de masse des différents BAP étudiés avec 5% ajouts.....	76
Tableau IV-12 : la perte de masse des différents BAP étudiés avec 10% d'ajouts.....	77

Notation et Abréviation:

BAP: Béton autoplaçant

BHP: Béton à Hautes Performances

BO: Béton ordinaire

BTHP: Béton à Très Hautes Performances.

BFM: béton de fibres métalliques

S: sable

G: gravier

E: Eau

SP: super plastifiant

E/C: Rapport massique Eau sur Ciment

E/L: Rapport massique Eau sur Liant (Ciment + additions minérales)

G/S: Rapport massique gravier sur sable

FC: Fillers Calcaires

E: Module d'élasticité

PV: poudre de verre

PL: poudre de laitier

PC: poudre de calcaire

Mf: module de finesse

HCl: acide chlorhydrique

P : poids

Résumé :

Le béton autoplaçant (BAP) est défini comme un béton très fluide qui se met en place sous l'effet de son poids propre, sans vibration interne ou externe. Le BAP doit être homogène et très stable vis-à-vis de la ségrégation et le ressuage.

Cette étude expérimentale consiste à préparer un BAP à base d'ajouts minéraux (calcaire, laitier, verre) utilisés séparément dans des ciments binaires, ainsi que l'utilisation d'un adjuvant super plastifiant, dont l'objectif principal est d'étudier l'influence des d'ajouts minéraux sur les propriétés du BAP dont on fait varier le taux de substitution de 5% et 10% pour les trois ajouts (calcaire, laitier, verre) afin de confectionner six types de bétons auto plaçant à étudier à l'état frais (l'étalement, la boîte en L, stabilité au tamis) et à l'état durci (la résistance à la compression et à la traction), ainsi que le milieu agressif (HCl).

Ce travail est aussi une fenêtre sur les voies de recherches qui peuvent être entreprises dans le domaine du recyclage du verre mixte dans les matériaux cimentaires.

Mots clés : Béton autoplaçant, ajouts, super plastifiant, milieu agressif, recyclage

المخلص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا تعرف بأنها خرسانة ذات قابلية تشغيل عالية وتأخذ مكانها بفعل وزنها فقط، بدون اهتزاز داخلي أو خارجي. الخرسانة المرصوصة ذاتيا يجب أن تكون متجانسة ومستقرة ضد العزل والنزيف.

وقد تم عملنا على أساس إضافة المواد (الحجر الجيري، فضلات الافران والزجاج) للخرسانة المرصوصة ذاتيا بطريقة متفرقة في الأسمنت الثنائي، وكذلك استخدام مادة مساعدة (الملدنين). الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير الإضافات على الخصائص الخرسانة المرصوصة ذاتيا مع استبدال 5% و 10% لكل من لحجر الجيري، فضلات الافران، الزجاج لنتحصل في الاخير على ستة خرسانات من كل نوع لدراسته في الحالة الطازجة: الانتشار، علية L واستقرار الغربال وفي الحالة الصلبة (قوة الضغط والشد)، والوسط الضار (حمض الهيدروكلوريك). هذا العمل هو أيضا نافذة على غرار البحوث التي يمكن القيام بها في مجال إعادة تدوير الزجاج مختلطة في المواد الإسمنتية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المرصوصة ذاتيا، الإضافات، الملدنين، الوسط الضار، وإعادة التدوير.

ABSTRACT

Self compacting concrete (SCC) is a very fluid concrete which can take place under the effect of its own weight, without vibration. SCC must be homogeneous and very stable against segregation and bleeding.

This experimental study is to prepare a SCC based mineral additives (limestone, slag, glass) used separately in binary cements as well as the use of an adjuvant (superplasticizer). The main objective of this work is to study the influence of mineral additives on properties with SCC deferring substitution 5% and 10% for three additions (limestone, slag, glass) to make six types of SCC to study in fresh form (spreading, box L, stability sieve) and the cured state (the compressive strength and tensile strength), and the aggressive medium (HCl).

This work is also a window on the lines of research that can be undertaken in the field of recycling of mixed glass in cementitious materials.

Key words: Self compacting concrete, additives, super plasticizer, aggressive medium, recycling.

Introduction Générale

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires, etc. [1]

De nos jours, le béton doit répondre à des exigences toujours plus sévères en matière de performance mécanique, de durabilité, d'ouvrabilité, d'environnement. Dans Ce but les recherches continues ont permis l'émergence des bétons spéciaux: les bétons à haute performances (BHP), les bétons à très haute performance (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons autoplaçants (BAP). [2]

Les bétons autoplaçants (BAP) représentent une nouvelle génération de bétons développés pour accélérer la cadence de construction et améliorer la qualité des structures.

Ce sont des bétons innovants qui s'adaptent à un bon nombre d'applications de génie civil, leur utilisation ne cesse de s'accroître et de s'élargir dans le domaine de la construction des ouvrages d'art, la préfabrication et la réparation des infrastructures.

Le sujet de ce travail s'articule autour de la formulation et des propriétés de bétons autoplaçants élaboré à partir d'ajouts minéraux et de comparer les performances en termes de résistance mécanique. L'étude consiste donc en l'investigation de l'influence de ces ajouts minéraux; à savoir : la poudre de verre (PV), poudre de calcaire (PC) et la poudre de laitier (PL) sur le comportement à l'état frais, et à l'état durci.

Problématique

Cependant, concilier entre fluidité, homogénéité, stabilité et coût de production représente un vrai défi. En effet, la formulation des BAP est relativement coûteuse par rapport à un béton ordinaire en raison de leur demande, relativement élevée, en liant et en adjuvants. Cela implique une exploitation croissante des ressources naturelles non renouvelables. Une des stratégies employées afin de pallier le problème de l'impact environnemental de cette classe de béton, sans perturber le développement économique

et social, est l'utilisation des ajouts cimentaires (AC) en remplacement partiel du ciment portland pour la fabrication de BAP à valeur ajoutée et respectueux de l'environnement.

Les questions qui se posent et auxquelles nous tenterons de répondre sont:

Quelle est l'influence de la PV, PL et PC sur les propriétés rhéologiques du BAP? Peut-on produire un BAP à base de PV, PC et de PL ayant des performances satisfaisantes?

L'objectif

Ce mémoire vise alors à apporter des réponses concrètes et ciblées quant à la faisabilité de valoriser la poudre de verre, la poudre de laitier et la poudre de calcaire dans un BAP écologique et économique, durable et à forte valeur de résistance mécanique.

Afin d'atteindre ce but, on s'est fixé les objectifs spécifiques suivants:

- Déterminer les propriétés d'écoulement des pâtes contenant différents taux de: PV, PL et PC.
- Détermination des performances à l'état durci des BAP pour évaluer l'effet de la poudre de verre, la poudre de laitier et la poudre de calcaire sur les propriétés mécaniques (Résistance à la compression, résistance à la traction) et la résistance au milieux agressifs.

Structure du mémoire

Ce mémoire se compose principalement en quatre chapitres:

Chapitre 1: *Revue générale sur le BAP*

Le premier chapitre constitue d'un rappel des définitions fondamentales sur le BAP, et les méthodes de formulation du BAP.

Chapitre 2: *Généralité sur les ajouts*

Ce chapitre est consacré à l'étude des propriétés et des caractéristiques des ajouts, leurs différents types et leurs influences sur le béton.

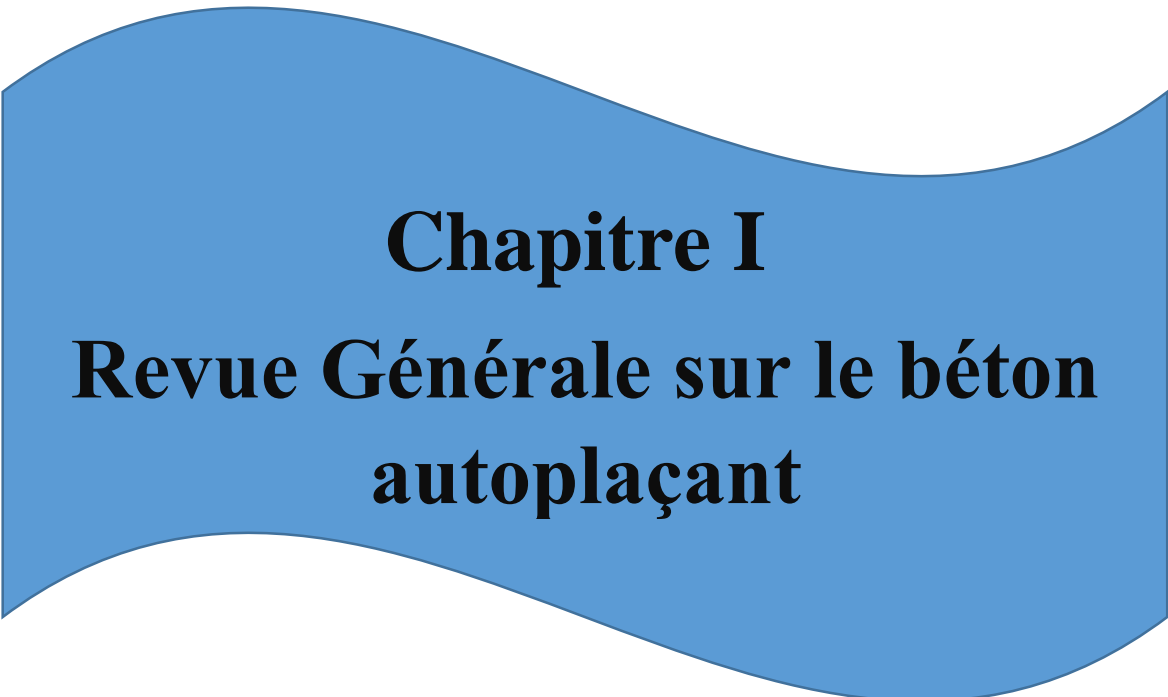
Chapitre 3: *caractérisation des matériaux et méthodes expérimentales*

Ce chapitre concerne le programme expérimental mis au point afin d'atteindre les objectifs fixés. Les caractéristiques des matériaux utilisés et les différentes Procédures d'essais sont décrites.

Chapitre 4: *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 où je souligne l'effet de la PV, PL, PC sur les propriétés d'écoulement des BAP, leurs propriétés mécaniques et leur résistance au milieu agressive. Cette partie constitue aussi une fenêtre sur les voies de recherche qui peuvent être entreprises dans le domaine du recyclage du verre broyé dans les matériaux cimentaires.



Chapitre I
Revue Générale sur le béton
autoplaçant

I.1. Introduction

L'emploi des BAP permet d'améliorer la qualité des travaux en termes de finition comme de durabilité et cette assurance n'est pas pour déplaire aux maîtres d'œuvre et d'ouvrage. La mise en œuvre de ces bétons particuliers avec un parc matériel réduit ouvre la voie à un plus grand nombre d'entreprises notamment celles de taille modeste pour la réalisation de chantiers plus importants.

IL en découle des performances mécaniques plus élevées mais dont l'utilité n'a pas toujours été prévue dans la conception initiale de l'ouvrage. La façon de formuler conduit inévitablement à des prix de revient un peu plus élevés que ceux des bétons courants et il s'avère nécessaire d'optimiser l'emploi de ces matériaux par une démarche plus globale au niveau du chantier pour en percevoir l'intérêt économique [3]

I.2. Historique et développement de BAP

L'idée de fabrication d'un béton qui assure un remplissage correct des coffrages, uniquement sous l'effet de son poids propre et sans avoir recours à aucune forme de vibration, a été conçue pour la première fois au Japon par des chercheurs de l'Université de Tokyo.

En 1983, quand la durabilité du béton et la productivité sont devenus un sujet d'intérêt majeur. Au cours de cette période, le Japon souffrait d'un manque de travailleurs qualifiés dans le secteur du bâtiment ce qui a affecté la maîtrise de la qualité du béton sur les chantiers de construction. Ainsi, le progrès et l'évolution en génie civil dans différentes applications telles que les ponts suspendus, les gradins ciel et surtout la grande orientation de l'usage des bâtiments vers une utilisation spécifique et une qualité architecturale accrue, ont été les enjeux concrets du développement des bétons fluides [4,5]; Alors l'idée d'un béton fluide ou béton auto plaçant (BAP) est apparue en 1989, Dès lors, la recherche, le développement et l'utilisation du BAP ont pris de l'ampleur en Europe et en Amérique du Nord une dizaine d'années après son premier développement [6].

I.3. Définition

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide qui s'écoule sous son propre poids et se met en place sans vibration, sans ségrégation et sans ressuage. L'association française de génie civil définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons (très fluides, homogènes et stables). [7]

Lors du coulage dans un coffrage, le serrage d'un BAP est assuré sous le simple effet de la gravité. Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage du coffrage tout en résistant parfaitement à la ségrégation. Homogènes et stables, ils présentent des résistances et une durabilité analogues à celles des bétons traditionnels dont ils se différencient par leurs propriétés à l'état frais.

IL existe de nombreux termes définissant ces bétons:

- * Béton auto-compactant (BAC)
- *Self-compacting concrete (SSC) en anglais.
- *Béton hyperfluide.

L'appellation la plus utilisée aujourd'hui est le béton autoplaçant (BAP). [8]

Les BAP diffèrent, du point de vue composition, par rapport au béton traditionnel ; en plus, des granulats, du ciment et de l'eau de gâchage, ils doivent renfermer des additions minérales, des superplastifiants (SP) et éventuellement des agents de cohésion. Les dosages de ces ajouts sont beaucoup plus élevés par rapport à ceux des bétons traditionnels pour garantir les propriétés intrinsèques aux BAP à l'état frais. Ils se caractérisent par une grande déformabilité, une capacité d'écoulement sans altération de la stabilité et un long maintien de l'ouvrabilité lors de leur écoulement et de leur mise en place.

Les bétons autoplaçants (BAP), bétons mis en œuvre sans vibration, constituent l'une des plus importantes innovations de la dernière décennie en matière de construction sur les chantiers comme dans les usines de préfabrication.

Les BAP sont:

1. Très fluides (Classe de consistance S5 au sens de la norme **NF EN 206-1**),
2. Absolument homogènes,
3. Mis en œuvre sans vibration,

Ils présentent des résistances et des durabilités analogues à celles des bétons traditionnels ou à celles des Bétons à Hautes Performances mis en œuvre par vibration.

Pour être utilisés en structure, ils doivent être conformes à la norme **NF EN 206-1**.

Les prescriptions et normes de conception et de dimensionnement des structures s'appliquent aux BAP [9].

I.4. Les avantages des bétons autoplaçants

On peut citer [10]:

I.4.1. Les avantages techniques

- Bon remplissage des coffrages et enrobage des armatures adéquat sans vibration.
- Facilité de coulage dans des endroits confinés et/ou difficiles d'accès.
- Possibilité de confectionner des structures de géométrie complexe et/ou fortement ferrillées.
- Meilleures performances et durabilité grâce à leur grande compacité.
- Propriétés mécaniques analogues ou supérieures à celles du béton vibré.
- Amélioration des qualités esthétiques des parements et des surfaces.
- Mise en place aisée par pompage.

I.4.2 Les avantages socio-économiques

- Optimisation du rendement des chantiers et des usines de préfabrication.
 - Augmentation des cadences de production et gain de temps
- Suppression des opérations coûteuses en mains-d'œuvre qualifiées pour le compactage du béton, le talochage et le ragréage des surfaces.
- Économie sur le coût global d'un projet.
 - Réduction des nuisances sonores sur les chantiers, notamment en milieux urbains, dues principalement à l'emploi de vibrateurs internes et/ou externes.
 - Diminution de la pénibilité du travail et amélioration des conditions de sécurité des ouvriers.

I.4.3 Les Avantages écologiques

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- Diminution de la quantité de CO₂ émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP) [11].

I.5 Concept du béton autoplaçant

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibrés, par leurs propriétés à l'état frais, ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique) [1] [12].

Pour parvenir au cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO, dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégié au détriment des gravillons (**Figure 1.1**), en général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche, c'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons, les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie [5].

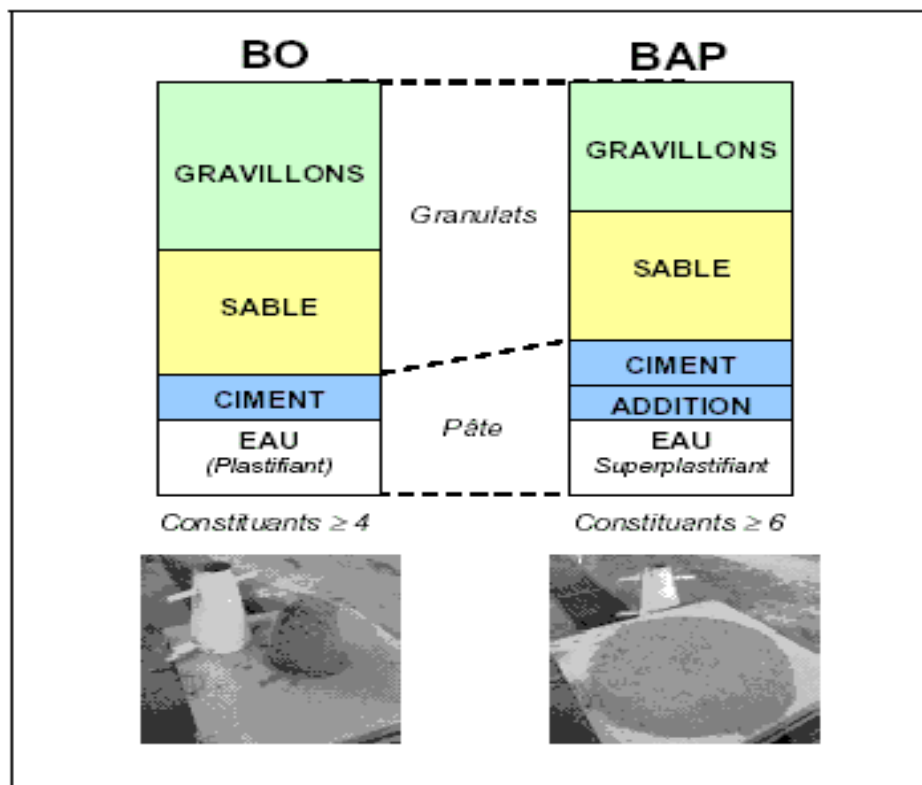


Figure 1.1. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP à l'état frais [13].

1.6 Les Constituants d'un BAP

Le ciment et l'eau sont les deux constituants principaux de la pâte de ciment, qui constituent la matrice d'un béton sont peu étudiés en tant que facteurs indépendants, leurs influences sur l'écoulement sont implicitement mises en évidence en se basant sur le rapport E/C, ce paramètre est très relié aux différentes propriétés des bétons, aux états frais et durci.

1.6.1. 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.

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% [14].

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

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

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts [15].

1.6.1.1. 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 CEM et numérotés de 1 à 5

en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse): [16]

- CEM I: Cement 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).

1.6.2 Eau

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.), une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton, cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats.

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton, l'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent.

Cependant l'introduction excessive d'eau provoque la chute de résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais [5].

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [17]:

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

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

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

I.6.3 Granulats

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0mm et 40mm (sable, graviers et cailloux); Ils constituent le squelette granulaire du béton dont l'origine peut être naturelle ou artificielle ou recyclée.

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.

En général le rapport granulats/sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP, le risque de blocage dans un milieu fortement ferrailé augmente lorsque le D max augmente. Ainsi, le D max des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm [18].

I.6.3.1 Le rôle des granulats

Il est bien connu que l'écoulement du béton est régi en grande partie par le comportement rhéologique de la pâte qui le constitue, cependant, les caractéristiques des granulats et leur proportion peuvent constituer des critères de performance des BAP. Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à l'effet de la teneur en granulats et du diamètre maximal des granulats [5].

Les granulats permettent tout d'abord de réduire considérablement le coût global du béton (cinq fois moins chers que le ciment), mais leur influence est déterminante sur la résistance mécanique du béton à l'état durci, la résistance mécanique du béton dépend fortement de la nature des granulats (propriétés intrinsèques), et de la compacité du squelette global, ainsi que de l'adhérence entre les granulats et la pâte du béton [19].

1.6.4 Les additions minérales

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, substituant ou non une partie du ciment, afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières, ce sont des matériaux finement divisés parmi lesquelles nous citons les fillers, la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau qui proviennent principalement de l'industrie, ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons.

IL existe deux catégories de fines minérales:

- **Les fines actives:** à caractère pouzzolanique ce sont des particules de faibles diamètres, qui ajoutées en quantité d'ordre de 10% poids de ciment. comme fumée de silice, cendres volantes, laitier
- **Les fines inertes:** comme les fillers de calcaires L'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton donc sa résistance [20].

1.6.4.1 Les avantages des additions minérales

1.6.4.1.1 Avantages économiques et environnementaux

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.

1.6.4.1.2 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. [21].

1.6.5 Utilisation des adjuvants

1.6.5.1 Super plastifiants

Les super plastifiants sont des produits organiques qui rajoutés dans de faibles proportions (habituellement de 1 à 5% de la masse du ciment) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue.

L'action principale des superplastifiants est de flocculer les grains de ciment, une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues, l'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure I-4), il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles [1].

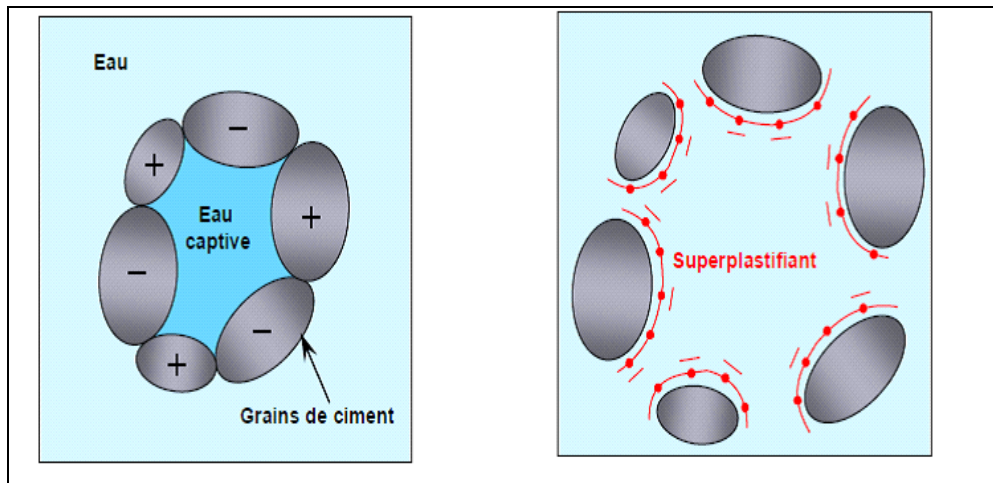


Figure I-2- Effet du super plastifiant sur les grains de ciment par le phénomène de dispersion [1]

1.6.5.2 Les différentes classes

Les super plastifiants sont des polyélectrolytes organiques, appartenant à la catégorie des dispersants polymériques, Les super plastifiants sont généralement classés en quatre groupes:

- Les polycondensats de formaldéhyde et de mélamine sulfonée (PMS)
- Les polycondensats de formaldéhyde et de naphtalène sulfoné (PNS)
- Les lignosulfonates modifiés (MLS) et les autres incluant les esters d'acide.
- Les sulfoniques, les polyacrylates et les polycarboxylates [22].

1.6.5.3 Mode d'action des super plastifiants

Les superplastifiants sont habituellement des polymères anioniques. La neutralité de la charge est assurée par un contre-ion (cation, qui peut être Na ou Ca). La terminaison anionique SO_3^- (hydrophile) permet l'adsorption de la molécule organique sur les sites chargés positivement de la surface des grains de ciment.

Les modes d'action des superplastifiants sont les suivants [23,24] :

1. Adsorption : les polymères s'adsorbent sur la surface des particules et ainsi changent leurs charges (potentiel zêta) en charge négative, ce qui crée les forces de répulsion entre les grains. La quantité de polymère adsorbée augmente avec sa masse molaire et la quantité des ions Ca^{++} dans la solution interstitielle. L'état d'adsorption et l'épaisseur de la couche formée dépendent du type de polymère et de sa masse molaire.

2. Effet stérique : les polymères attachés sur la surface des particules avec une partie de la chaîne agissent comme une barrière physique et empêchent les particules de ciment de se rapprocher dans la région des forces de Van der Waals des autres particules.

3. Modification de la morphologie de certains hydrates : certains hydrates changent de morphologie en présence de superplastifiant, par exemple l'ettringite cristallise en forme d'amas sphéroïdaux en présence de superplastifiant, ce qui diminue des forces de frottement entre les hydrates, et en forme des longues aiguilles en absence de superplastifiant [25].

4. Adsorption sur les sites actifs : En s'adsorbant sur les sites actifs des grains de ciment les superplastifiants interfèrent avec les réactions d'hydratation, ce qui empêche l'eau d'atteindre des grains (inhibition des sites réactifs). Alors l'eau reste libre et fait son action lubrifiante. Avant la période dormante c'est bénéfique car la période d'ouvrabilité est ainsi prolongée, mais pendant et après la période dormante ce n'est pas désirable surtout s'il s'agit de retards importants car ça nuit au développement des résistances à jeune âge et prolonge le temps de décoffrage du béton sur le chantier. Il a été remarqué que ce sont surtout les polynaphtalènes sulfonates de masse molaire faible qui ont une interaction spécifique avec les sites de C_3A [26].

1.6.5.4 .Influence des super plastifiants sur l'écoulement du béton

Différents auteurs se sont intéressés à l'influence des superplastifiants et de leurs caractéristiques sur la fluidité des pâtes cimentaires. Grâce aux mécanismes d'actions décrits ci-dessus, les superplastifiants agissent soit par répulsion électrostatique, soit par effet stérique, afin d'augmenter la fluidité du mélange et de disperser les particules solides. Ainsi le seuil de cisaillement et la viscosité d'un mélange cimentaire diminuent avec l'ajout d'un superplastifiant.

L'ajout d'un superplastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des bétons que ce soit du point de vue de leur étalement ou du point de vue de leur seuil d'écoulement. Il permet d'augmenter le premier et de réduire le second.

Toutefois, l'influence d'un superplastifiant sur le comportement de la pâte dépend de son dosage, de ses caractéristiques et de son mode d'utilisation. En effet les interactions et l'état des superplastifiants dans les suspensions de ciment. Ils ont divisé la quantité de superplastifiant ajoutée à la suspension de ciment en trois parties [24] :

- *Partie 1* : le superplastifiant est consommé par les réactions d'hydratation, notamment au cours de la formation du C-S-H et de l'AFt (phénomène de complexation). Cette fraction de polymère peut interagir avec différents produits d'hydratation pour former une phase organo-minérale (POM). Elle n'est alors plus disponible pour la dispersion des agglomérats de ciment.

- *Partie 2* : le superplastifiant s'adsorbe sur les phases hydratées des particules de ciment. Cette fraction de polymère qui n'est pas incorporée dans la phase organo-minérale est la plus importante pour la dispersion des grains de ciment, cependant il est difficile de la mesurer.

- *Partie 3* : la troisième partie du superplastifiant est celle qui reste disponible dans la solution interstitielle entre les particules de ciment. Si suffisamment de polymère a été ajouté pour saturer la surface, le superplastifiant ne peut pas s'adsorber et reste en solution.

Ainsi, le dosage du superplastifiant à ajouter à une suspension cimentaire doit être suffisant pour permettre à une quantité de rester disponible dans la solution interstitielle, contribuant à obtenir une fluidité plus grande, et qui dure plus longtemps avant le début de prise de la suspension. L'utilité de cette dernière partie par le besoin d'une quantité en réserve pour couvrir les surfaces naissantes et pour remplacer les molécules consommées par complexation [27].

D'autres auteurs montrent que la fluidité d'une pâte de ciment augmente avec le degré d'adsorption du superplastifiant (toutes catégories) [28,29], mais aussi lorsque la longueur des ramifications des polymères (PC et POE) est plus importante [30]. Ce dernier paramètre est aussi responsable de l'action prolongée du superplastifiant. Alors que les superplastifiants à base de sulfonate s'adsorbent à plat sur les particules de ciment, ceux à base de polycarboxylates s'adsorbent par l'intermédiaire de leurs charges

anioniques actives, laissant leurs ramifications se prolonger loin dans la solution interstitielle.

Ainsi, les superplastifiants à base de polycarboxylates par exemple, peuvent maintenir une fluidité ou une ouvrabilité constante pendant au moins 50 minutes avant le début de prise du mélange cimentaire [29].

I.7 Propriétés du béton fluide à l'état frais

Les propriétés du béton frais jouent un rôle majeur dans le domaine des technologies du béton. Par exemple, les caractéristiques du béton à l'état durci dépendent souvent de celles que possédait le béton frais durant son transport, sa mise en place et sa finition.

La fluidité et l'homogénéité (la stabilité) constituent les deux paramètres qui permettent de donner une appréciation sur les caractéristiques du béton à l'état frais. Ces paramètres sont étudiés sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques. Ces critères sont : la capacité au remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité de passage [31].

I.7.1 Capacité au remplissage

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant 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 (vibrations externe ou interne). 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 [7], puisque le diamètre final atteint par la galette de béton correspond à la capacité de déformation, et le temps de passage à un certain diamètre (à 50 cm de diamètre par exemple) correspond à la vitesse de la déformation du béton.

Du point de vue rhéologique, la fluidité du BAP se traduit par un faible seuil de cisaillement, et une viscosité suffisante pour assurer le maintien des granulats dans la suspension. La fluidité de la pâte peut être assurée par l'ajout d'un superplastifiant qui

agit en baissant fortement le seuil de cisaillement de la pâte, et celui du béton si les frottements intergranulaires sont minorés par un volume suffisant de pâte [32].

1.7.2. 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 solides et liquides ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [7]. 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.

1.7.3. Capacité de passage

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement sur un chantier. Cependant, dans les milieux confinés et les zones fortement ferraillées, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué d'une part par la quantité importante de granulats dans le béton (plus de gravier, plus de risques de blocages), et d'autre part par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la figure 1.3 qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

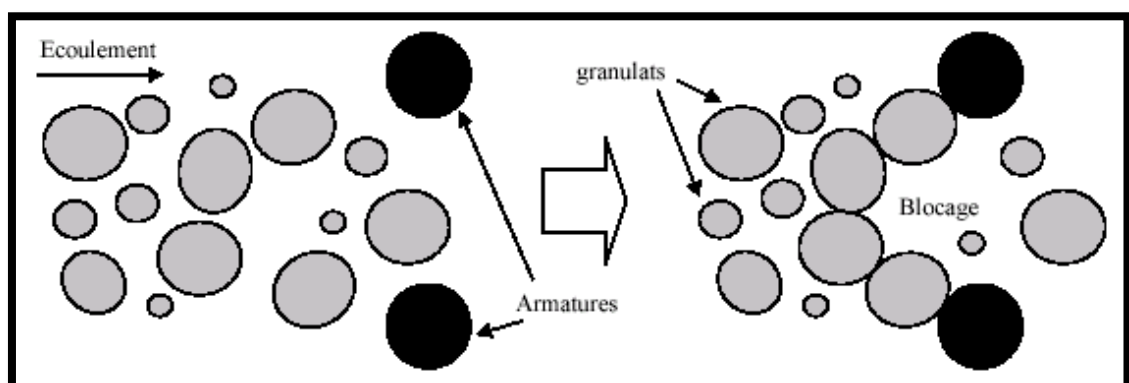


Figure 1.3. Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures [33].

A l'approche des armatures, une différence se crée entre la vitesse des granulats et celle de la pâte. Plus rapide, la pâte précède les granulats en passant à travers les armatures [33]. Ainsi, la quantité de granulats est considérée localement plus grande avant les armatures et tend à augmenter avec l'écoulement du béton.

Ce phénomène s'explique par le lessivage de la pâte à travers les granulats au niveau du passage entre les armatures [34].

1.8. Propriétés du béton fluide (BAP) à l'état durci

1.8.1. Propriétés mécaniques

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition [19]. Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats. Les propriétés de ce mélange (module, retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait.

1.8.2 Résistance mécanique

Les résistances mécaniques d'un BAP sont, comme pour la plupart des bétons directement liées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment, elles dépendent aussi de la composition du liant. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistances jusqu'à des BAP à hautes performances (80 à 100 MPa au 28^{ème} jour) [7]. L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [35]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. En fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges. De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique [36].

1.8.3 Module d'élasticité

Pour des rapports gravier sur sable G/S similaires, le module d'élasticité des bétons autoplaçants (BAP) est équivalent à celui des bétons vibrés (BO). Par ailleurs, pour des rapports G/S différents, le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons autoplaçants. En effet, le module de la matrice du béton est compris entre 6000 et 25000 MPa, alors que celui des granulats (non légers) Eg se situe entre 60000 et 100000 MPa. Pour les bétons réalisés avec des granulats classiques, le module de la matrice est donc environ 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats. En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leur module respectif (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats) [7, 37].

1.8.4. Retrait

Au cours de la phase plastique, le béton connaît une première contraction volumique. Après la prise, le béton, qui devient un solide poreux, va encore subir quatre formes de retrait :

a- Le Retrait Thermique (plastique) :

Les réactions d'hydratation libèrent en fin de prise une certaine quantité de chaleur. Un élément en béton subit alors un échauffement, fonction des conditions d'échange avec le milieu extérieur.

En découle une dilatation, suivie d'une contraction, qualifiée de retrait thermique, lorsque sa température diminue jusqu'à la température ambiante.

A première vue, le retrait thermique ne devrait pas avoir de conséquence pour le béton, car la contraction n'est que le retour au volume initial, d'avant la dilatation (si, bien sûr, le coefficient de dilatation thermique est supposé constant). Cependant, les propriétés mécaniques évoluent très vite au jeune âge. Le module élastique, en particulier, est plus grand pendant la phase de refroidissement. Contrairement aux variations de température, il n'y a donc pas réversibilité des contraintes engendrées par un empêchement des déformations. Il en résulte une contrainte de traction résiduelle, pouvant mener à la fissuration du béton [14,38].

b- Le Retrait Endogène ou d'Autodesiccation : L'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution de volume. Après la prise, l'hydratation se poursuit.

Le retrait endogène est la conséquence macroscopique de la contraction d'origine chimique [37].

c- Le Retrait de Séchage ou de Dessiccation : est la déformation volumique créée par le séchage à la surface du béton.

Le moteur de la dessiccation est un déséquilibre hydrique après la prise, l'humidité relative est plus élevée au sein du béton que dans l'air ambiant [37].

d- Le Retrait de Carbonatation : À la surface d'un béton, la pâte de ciment peut réagir avec l'eau et le gaz carbonique de l'air ambiant. Cette réaction, la carbonatation, s'accompagne d'une contraction volumique. La peau du béton peut en conséquence se fissurer, on parle de faïençage. À la vue du volume de pâte plus important, les BAP sont susceptibles d'être plus déformables que les bétons ordinaires. Les données de la littérature dans ce domaine montrent bien une tendance d'un retrait total plus important pour les BAP.

Comme leur retrait endogène varie entre 180 et 250 $\mu\text{m}/\text{m}$, il semble être inférieur ou égal à celui des bétons ordinaires, leur retrait de séchage est donc plus élevé (environ 800 $\mu\text{m}/\text{m}$).

Ce retrait de séchage est d'autant plus important que le rapport E/C est grand mais paraît d'autant plus faible que le rapport G/S est élevé [37].

1.8.5. Déformation sous charge (fluage)

Les déformations différées d'un ouvrage en béton comportent des déformations libres (retrait endogène, retrait de dessiccation) et des déformations dues aux diverses charges appliquées. Les déformations du béton soumis à l'action d'une charge instantanée (charge inférieure à 30 à 50% de la charge de rupture) conduisent à des contraintes réversibles qui suivent la loi de Hooke :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.1)$$

Où σ est contrainte appliquée, E le module d'élasticité, ε la déformation.

Lorsque la charge est appliquée pendant un certain temps, la "viscosité" du béton intervient et la déformation résultante augmente graduellement avec le temps. Il y a fluage du béton qui se comporte alors comme un corps élasto-visco-plastique. Les déformations de fluage ne sont pas des grandeurs directement mesurables et nécessitent la connaissance des déformations sous charge et de retrait pour être déterminées.

D'après les résultats présentés par Proust [39], les comportements des bétons autoplaçants peuvent différer d'une formulation à l'autre. Globalement, les BAP subissent

des déformations sous charge équivalentes ou légèrement supérieures à celles des bétons vibrés correspondants. Les vitesses de développement des déformations diffèrent peu d'un type de béton à l'autre. Ainsi, l'augmentation des déformations différées attendue en raison du volume de pâte plus important, ne semble pas avérée. D'après ces données, quel que soit le mode de conservation, les BAP possèdent des comportements différés sous charge semblables à ceux des bétons vibrés.

1.8.6. Propriétés physicochimiques et durabilité

La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts de matière (en particulier d'agents agressifs) à l'intérieur d'un matériau poreux comme le béton. Il est couramment prétendu que meilleure est la résistance d'un béton à ces transferts, plus durable sera celui-ci. Les propriétés de transfert du béton sont donc utilisées progressivement comme critère de sa durabilité. La pénétration de gaz, d'eau ou d'autres fluides dans le béton s'effectue par l'intermédiaire des pores de la matrice cimentaire et des interfaces pâte - granulats. Les trois principaux mécanismes des transferts de fluides à l'intérieur du béton sont la perméabilité, la diffusion et l'absorption. La perméabilité concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression. La diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'action d'un gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires.

Dans le domaine physico-chimique, les résultats des essais expérimentaux (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlore, absorption d'eau et carbonatation accélérée) ont été comparés en fonction de la résistance mécanique pour les deux types de béton (BAP et BO). La perméabilité à l'oxygène des bétons autoplaçants est inférieure à celle des bétons ordinaires vibrés pour une gamme de résistance donnée. Il n'y a pas de différence significative entre les BAP et les BO en termes de diffusion des ions chlore et d'absorption d'eau par capillarité. Et toujours à résistance équivalente, le taux de carbonatation des deux types de béton reste comparable. Ces propriétés évoluent avec la résistance en compression de manière identique pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires [37].

1.9 Les Approches de formulation

IL n'existe pas de méthode universelle pour formuler un BAP. L'approche de formulation adoptée dépend du type d'application et des exigences spécifiques de chaque projet de génie civil. Néanmoins, toutes les approches de formulations visent à assurer un BAP fluides et homogène sans ségrégation et sans ressuage.

Quelques approches de formulation des BAP sont résumées dans les paragraphes suivants:

1.9.1 Différents types des méthodes

1.9.1.1. Méthode japonaise

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

- **Dosage des gravillons**

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité, par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides, elle dépend bien sûr du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la Procédure du LCPC, la compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57, dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³, dans le cas de la formule de Granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

- **Dosage du sable**

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

- **Dosage du liant**

La méthode ne précise pas comment doser le liant, néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse

minimale de ciment de 350 kg/m³), les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

- **Dosage de l'eau et du super plastifiant**

Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %, on réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir [11].

1.9.1.2 Méthode Suédoise: proposée par [Petersson et al, 1996]

La méthode suédoise repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales, ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène.

La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée, leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables. [40]

1.9.1.3 Méthode Française

Méthode française (LCPC): proposée par [De Larrard et al, 1994]: Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC), ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange, il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

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

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

- la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple) le dosage, à saturation, du super plastifiant est déterminé, selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- le besoin en eau de ce mélange (en présence du super plastifiant) est déterminé Les Calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

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

Une formulation de béton 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. [41]

1.9.1.4 Autres Méthodes

D'autres méthodes de formulation, que nous ne développerons pas dans cette étude bibliographique, ont été publiées tels que la méthode reposant sur la théorie de «l'excès de pâte » : proposée par [Oh et al, 1999] ; la méthode d'évaluation simple utilisée par [Ouchi et al, 1999] (étudié interaction entre les granulats et les particules fines du mortier frais) etc.

1.9.2 Comparaisons des approches

D'après une étude comparative des trois approches de formulation, [13] on conclut que:

- L'approche japonaise donne un béton très visqueux parce que renfermant un volume de pâte trop élevé, déduire le volume de gravillons de leur compacité est cependant un élément intéressant pour rationaliser l'approche actuelle de la formulation.
- La méthode de formulation basée sur la minimisation de la pâte ne nous a pas permis d'obtenir un BAP répondant aux exigences du cahier des charges.
- L'utilisation du logiciel Bétonlab est certainement l'approche la plus cartésienne de la formulation des BAP (et des bétons en général) : on caractérise d'abord finement les constituants, puis on formule, c'est un outil pédagogique intéressant, puisqu'il permet d'appréhender l'influence de chaque constituant sur le comportement du béton, au moyen de simples simulations.

Tableau1.1: Paramètres de formulation des différentes approches. [42]

Méthode de formulation	Paramètres recommandés	Paramètres calculés	Paramètres expérimentaux
Méthode japonaise (Okamura)	<ul style="list-style-type: none"> -Dosage en ciment norme:(Mc=350 kg), -Dosage en filler selon liant (L= 600 kg), -Rapport de SP/L arbitraire (0.7, 1, 1, 3%), - Volume d'air arbitraire: (1.5%). 	<p>-Volume de gravier : Compacité gravier/2,</p> <p>-Volume de sable : (40% du volume de mortier,</p> <p><i>Les autres constituants sont déduits à partir des paramètres recommandés choisis</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -Compacité de gravier, -Dosage en eau : déterminé par des essais d'étalement sur pâte, -Dosage en SP : déterminé par des essais d'étalement et d'écoulement sur mortier, -Essais de contrôle sur BAP obligatoires. <p><i>N.B. C'est une méthode semi-empirique</i></p>
Méthode canadienne (Khayat)	<ul style="list-style-type: none"> -Dosage en ciment : norme (Mc=350 kg), -Dosage en gravier : VG= 30% Vtotal, -Gravier/Sable : (G/S =1), -Dosage en liant et en adjuvant : (V Liant = 186 litres/m3), -Rapport de SP/L arbitraire (0.7, 1, 1, 3%), -Rapport Eau/Liant (= 0.41), -Volume d'air arbitraire: (1.5%). 	<p><i>Les constituants sont déduits à partir des paramètres recommandés choisis et des caractéristiques des matériaux</i></p>	<p>Les dosages des différents constituants du BAP sont ajustés expérimentalement par les essais de caractérisation sur différentes formules de BAP jusqu'à l'obtention des propriétés autoplaçantes (fluidité, capacité de remplissage, résistance à la ségrégation,),</p> <ul style="list-style-type: none"> - Essais de contrôle sur BAP obligatoires. <p><i>N.B. c'est une méthode purement empirique</i></p>
Méthode Suédoise Bui et Montgomery	<ul style="list-style-type: none"> - Dosage en ciment norme (Mc=350 kg), - Rapport (G/S =1) ou (VS/(VS+VG)=0.5), - Rapport Filler/(Filler+Ciment) : (F/(F+C)= 0.3) ou bien la masse du liant (L= 500 kg/M3), - Rapport de SP/L arbitraire (0.7, 1, 1,3%),, - Volume d'air arbitraire: (1.5%). 	<ul style="list-style-type: none"> - Le volume de pâte: $V_p = \max \{VP1, VP2\}$, -Critère de fluidité : Volume de pâte (VP1), -critère de non blocage : VP2 <p><i>Les autres constituants sont déduits à partir Des paramètres recommandés choisis et des caractéristiques des matériaux.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -Distance moyenne minimale emini entre les granulats en fonction de Dmoyen pour différents rapports massiques eau sur liant, -La courbe $V_{bi} = f(e/d_i)$ est déterminée d'une manière expérimentale, - Essais de contrôle sur BAP obligatoires. <p><i>N.B. C'est une méthode semi-empirique</i></p>

1.10 Fabrication des Bétons Autoplaçants

Les formulations des BAP et leur fabrication nécessitent la mise en œuvre de procédures de fabrication et de contrôles adaptés. La plupart des malaxeurs peuvent fabriquer des BAP. Le temps de malaxage est toutefois légèrement supérieur à celui d'un béton classique. Il faut que le mélange, riche en éléments fins et en adjuvants, soit le plus homogène possible. Certaines formules peuvent nécessiter des séquences de malaxage spécifiques (ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur, temporisation, temps de malaxage adaptés...).



photo 1.4: malaxeur à béton [9]

L'un des points les plus importants de la fabrication est le contrôle strict de la teneur en eau du mélange, par conséquent, il est important de contrôler celle des granulats. La fabrication des BAP nécessite un contrôle renforcé des constituants afin de garantir la régularité des performances.

L'hyperfluidité du béton conduit à prendre des dispositions spécifiques pour éviter des déversements et à adapter l'ouvrabilité au temps de transport et de mise en œuvre.

1.11 Contrôle des Bétons Autoplaçants

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

1.11.1. La mesure d'étalement au cône d'Abrams [NF EN 12350-8]

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au Cône d'Abrams (essai d'étalement ou slump flow).

Des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP. La valeur cible d'étalement doit être définie en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre.

Cet essai caractérise la mobilité du BAP en milieu non confiné. Il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier.

Le matériel utilisé pour pratiquer cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque métallique. L'essai consiste à remplir le cône d'Abrams en une fois, puis à le soulever et à mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement obtenue.

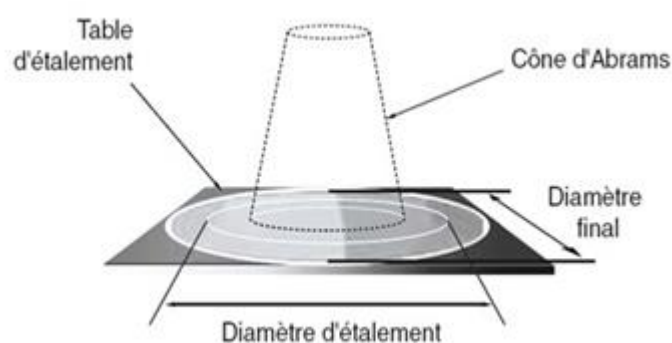


Figure I.5 Essai au cône d'Abrams

La norme NF EN 206-9 prévoit une répartition des BAP en trois classes (**Tableau I-2**).

Tableau I- 2: classes d'étalement [43]

Classe	Etalement en mm
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

1.11.2 L'essai de la boîte en L [NF EN 12350-10]

La cohésion du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée peuvent se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures. La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe, à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure, ferrailage complexe ou simple). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H1) et horizontales (H2).

Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage $H2/H1$ qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.

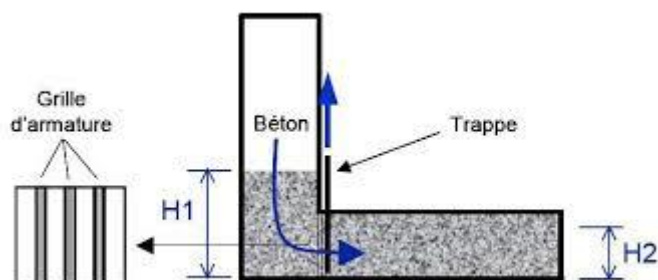


Figure 1.6: essai de boîte en L

Tableau I-3: classe d'aptitude à l'écoulement [43]

Classe	Taux de remplissage $H2/H1$
PL1	$\geq 0,80$ avec 2 armatures
PL2	$\geq 0,80$ avec 3 armatures

1.11.3 L'essai de stabilité au Tamis [NF EN 12350-11]

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton (2 litres) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Puis au bout de 2 minutes, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis.

Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 et 20% [9].

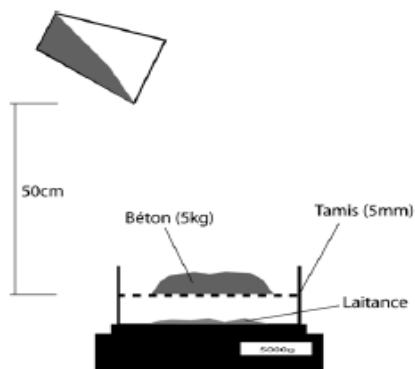


Figure I-7: Essai de stabilité au Tamis [43]

Tableau I- 4: Classes de résistance à la ségrégation - essai de stabilité au Tamis [43]

Classe	Pourcentage de laitance
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

1.12. Transport des BAP

En raison de sa fluidité élevée, le béton autoplaçant doit être transporté en camion Malaxeur, comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le Transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres:

Le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.

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

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton .en revanche tout ajout d'eau est à proscrire [44].

1.13. Mise en place des BAP

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

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

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

La mise en place des BAP peut se faire par pompage, par cette troisième méthode il y a réduction du bullage et obtention de parements lisses. Pour réussir les ouvrages en béton autoplaçant il est capital d'appliquer scrupuleusement les recommandations de fabrication, de transport et de mise en œuvre [45].

1.14 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, planchers, dalles, 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

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

Le pont Akashi Kaikyo (**Figure I-8**), le plus long pont suspendu au monde (3910 m) ou 390000 m³ de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMIRA et coll.1994) [41].



Figure I- 8: Le pont Akashi Kaikyo (japon) [41]

La tour Landmark Tower (Figure I-9), où un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune).



Figure I-9: La tour Landmark Tower (tokyo). [41]

I.15 Conclusion

Les BAP affirment leurs performances au fil des réalisations, ils s'imposent progressivement et remplaceront dans les prochaines années pour un grand nombre d'applications les bétons mis en œuvre par vibration.

Les BAP sont la réponse à l'évolution:

- des exigences techniques et esthétiques des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des architectes,
- des contraintes économiques des entreprises (amélioration de la productivité des chantiers),
- Des exigences environnementales liées à la réduction des impacts des chantiers.

ILS contribuent pleinement à l'amélioration des conditions de travail et à la sécurité sur les chantiers. [9]

A blue banner with wavy top and bottom edges, containing the chapter title in bold black text.

CHAPITRE II
Généralités sur les ajouts
minéraux

II.1 Introduction

Les ajouts minéraux font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques du béton à l'état frais et durci, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique, le remplacement partiel du ciment par des ajouts cimentaires offre plusieurs avantages économiques et environnementaux. La réduction de la qualité de ciment requise entraîne une baisse des coûts de production, de la consommation énergétique et des émissions polluantes liés à la fabrication du ciment portland. Les pays industrialisés tels que les États-Unis, la Russie, la France, l'Allemagne, et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendre volante, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau [46], en Algérie l'industrie cimentaire est d'importance primordiale comme tous les pays en voie de développement.

II.2 Définition

D'après leur composition, les ajouts minéraux, tels que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, les fumées de silices, les pouzzolanes etc..., contiennent principalement de la silice amorphe qui réagit avec l'hydroxyde de calcium et en présence d'eau, ils donnent des composés hydratés suivant une réaction exothermique à condition que le niveau d'énergie libre au départ est suffisamment élevé pour aboutir à un système plus stable ayant des propriétés hydrauliques.

Les ajouts existaient soit sous forme de produits naturels qui ne devaient être que peu traités, soit ils résultaient de processus industriels sous forme de déchets ou de sous-produit. Ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant le but de l'addition et le rôle qu'elle peut jouer. Seul des ajouts bien définis permettent d'exploiter au mieux leurs propriétés et avantages [47].



photo II.1: les ajouts de gauche à droite: calcaire, laitier, verre.

II.3 Classification des ajouts minéraux

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs [45]. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau (II.1) ci-dessous.

Tableau (II.1) : Classification des ajouts selon leur réactivité [48].

Type	Réactivité	Matériaux
Hydraulique	Fortement Réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique.
		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Hydraulique Latent		
Pouzzolanique	Fortement Réactif	Fumée de silice.
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres à diatomées).
	Faiblement Réactif	Scories cristallines
Inerte	Non Réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

II.4 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

II.4.1 Intérêt du point de vue technique

- ✓ L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice).
- ✓ Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.
- ✓ les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration
- ✓ Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau [48].

II.4.2 Intérêt du point de vue économique

- ✓ Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie.
- ✓ La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland [48].

II.4.3 Intérêt du point de vue environnemental

- ✓ La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO₂. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO₂ [48].

II.5 Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux

- ✓ Retard de prise.
- ✓ Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- ✓ Durcissement plus long.
- ✓ Résistance à l'écaillage controversée.

- ✓ Le broyage et le transport plus cher [49].

II.6 les différents types des ajouts

II.6.1 calcaire

Un filler calcaire est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche calcaire de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires (NF P18-508).

L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement, s'insère dans le squelette granulaire du ciment (Figure II-2) et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats), l'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci [43]

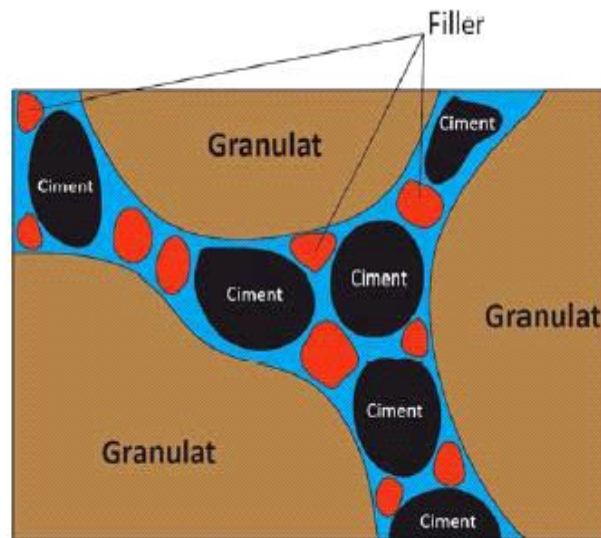


Figure II-2: Illustration de l'effet filler [43]

Le filler calcaire semble avoir une faible influence sur la demande en eau et peut conduire à une légère diminution de viscosité du mélange cimentaire ceci peut justifier l'utilisation de cette addition à dosages élevés dans la formulation des bétons (BAP et BHP), cependant, plusieurs auteurs ont remarqué que, pour un dosage constant en ciment (ou un rapport E/C constant), l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer la viscosité d'une pâte de ciment (malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides), avant de provoquer.

Une augmentation de la viscosité lorsque son dosage dépasse une certaine valeur critique, qui dépend du rapport E/C. [50]

Yahia et al [51] montrent qu'à chaque rapport E/C correspond un dosage optimum en filler calcaire qui peut assurer un écoulement optimal du mélange cimentaire.

II.6.1.1 L'influence sur les caractéristiques des bétons frais

- ✓ La rhéologie des pâtes, des mortiers et des bétons dépend de la qualité du filler et de sa finesse, si le filler est finement broyé il y aura une réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe.
- ✓ Un rôle de remplissage.
- ✓ Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C3S et du C3A. [52]

II.6.1.2 L'influence sur les caractéristiques des bétons durcis

- ✓ Les fillers calcaires contribuent à la formulation de mono-carbo-aluminates et à la modification de la microstructure. L'addition du CaCO_3 accélère l'hydratation du C3S au jeune âge par modification de la surface de ce dernier et de son nucléation.
- ✓ La contribution aux gains de résistances apportée par le filler calcaire est due principalement à la réduction de la demande en eau et un meilleur potentiel hydraulique du clinker. [53]

II.6.2 Le laitier de haut fourneau

Les laitiers de haut fourneau sont des co-produits formés lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer.

Ce sont des silico-aluminates de chaux traités de différentes façons à la sortie du haut fourneau. Selon le processus de refroidissement du laitier en fusion, on distingue deux familles [54]:

- Le laitier vitrifié obtenu par un refroidissement brutal à l'eau, lui confère une structure vitreuse. Cela lui permet de développer des propriétés hydrauliques. Ce laitier refroidi à l'eau est appelé 'laitier granulé'
- Le laitier cristallisé, obtenu par un refroidissement lent à l'air, est une roche dure artificielle et chimiquement stable. Dans le monde, on dispose d'à peu près 250 millions de tonnes par an de laitier de haut fourneau. Cependant l'utilisation des additions minérales n'est que d'environ 90 millions de tonnes pour produire au moins 280 millions de tonnes de béton aux additions minérales [55].

En Algérie la production annuelle du laitier est estimée à 500.000 tonnes [47].

II.6.2.1 L'influence sur les caractéristiques des bétons frais

- ✓ L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer l'ouvrabilité par rapport à un béton conventionnel. Ce phénomène est expliqué par les caractéristiques des surfaces des grains de laitier qui permettent un meilleur glissement intergranulaire dans la pâte. Il souligne aussi le très faible taux d'absorption d'eau par les grains de laitier au début du malaxage.
- ✓ L'addition de laitier favorise le taux de ressuage du béton, quel que soit le type de laitier. Ceci peut s'expliquer par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise [56].

II.6.2.2 L'influence sur les caractéristiques des bétons durcis

- ✓ Les bétons préparés avec du laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours. Cependant, cette résistance se développe à partir du vingt-huitième (28) jour jusqu'à 90 jours [57].
- ✓ Un remplacement de 10 % du ciment par du laitier permet de réduire l'épaisseur de la zone de transition [56]. La durabilité des bétons contenant du laitier de haut fourneau dépasse celles d'un béton à base d'un ciment Portland.
- ✓ Le retrait est moins important surtout à 28 jours.

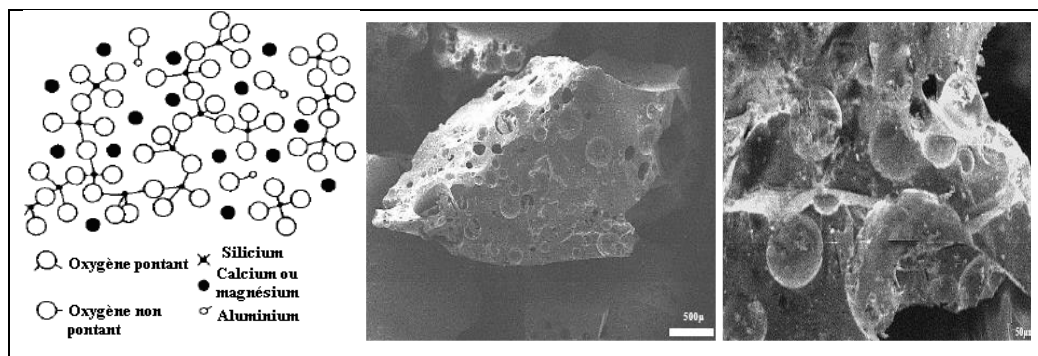


Figure II.3: Structure du laitier [58].

II.6.3 La poudre de verre

La poudre de verre est un ajout cimentaire alternatif de couleur blanche. Elle est obtenue après la collecte et le broyage des fragments de verre coloré. Sa haute teneur en

silice amorphe SiO_2 lui confère des propriétés pouzzolaniques en se combinant avec la chaux pour produire d'autres hydrates. L'utilisation de la PV comme ajout cimentaire a fait l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une vingtaine d'années [35].

II.6.3.1 L'influence sur les caractéristiques des bétons frais

- ✓ l'effet de la finesse de la PV sur les performances à l'état frais et à l'état durci des bétons (ordinaire, haute performance et autoplaçant), une finesse semblable à celle du ciment soit une valeur optimale pour l'obtention d'une ouvrabilité acceptable.
- ✓ L'incorporation de 20 % de poudre de verre diminue le seuil de cisaillement de 32 % et la viscosité plastique de 21%.
- ✓ L'absorption quasi nulle de la poudre de verre constitue aussi un facteur de diminution du dosage de SP requis pour un étalement donné. [59].

II.6.3.2 L'influence sur les caractéristiques des bétons durcis

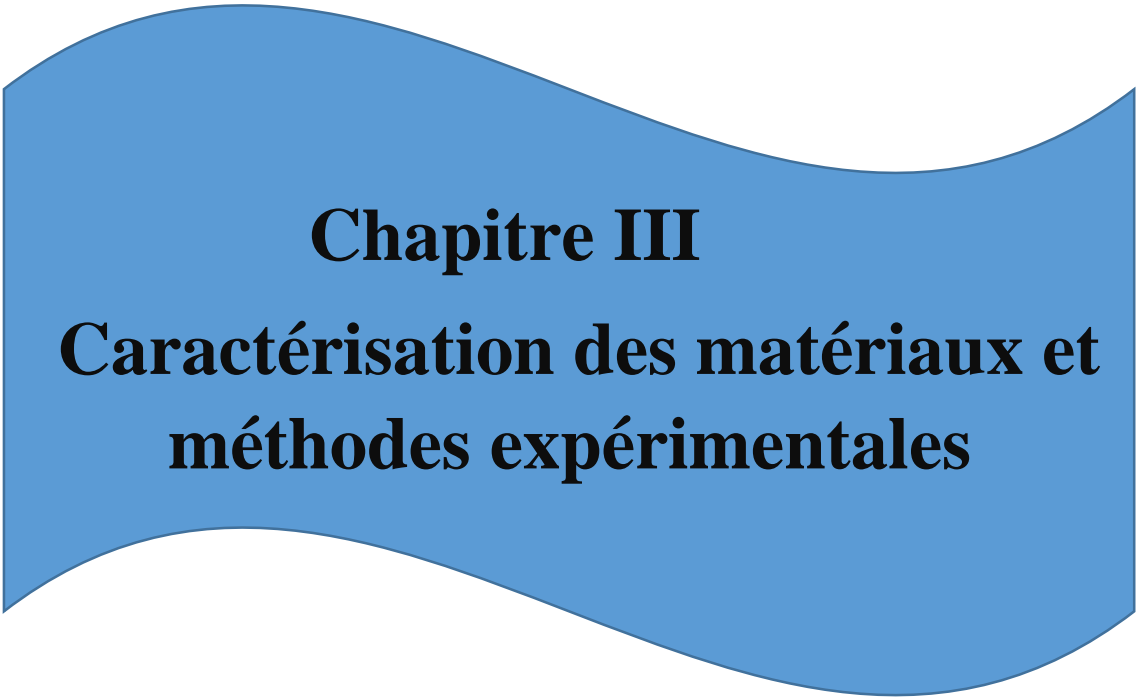
- ✓ La poudre de verre a une pouzzolanité similaire, voire supérieure à celle des cendres volantes. De ce fait, cet ajout alternatif contribue aux gains de résistances mécaniques et de durabilité dans le temps.
- ✓ Le développement des résistances à la compression augmente avec la teneur en PV entre 28 et 91 jours [59].

II.7 L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni – Saf.

II.8 Conclusion

L'utilisation des ajouts est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton et de ciment en raison de ces conditions d'environnement ou des performances mécaniques. Ces addition affectent de manière significative la rhéologique des matériaux cimentaire à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance et de la durabilité des matériaux durcis.

A blue banner with wavy top and bottom edges, containing the chapter title in black text.

Chapitre III
Caractérisation des matériaux et
méthodes expérimentales

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 matériaux prélevés ont été soumis aux essais d'identification au sein du laboratoire de génie civil de l'université Med El-Bachir El-Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj, selon un programme d'essais réalisé conformément aux normes européennes. Les essais effectués sur les matériaux sont l'analyse granulométrique, l'équivalent de sable et les masses volumiques (apparente et absolue).

- Le sable à l'origine siliceux provenant d'OUAD SOUF
- Deux fractions de gravier concassé (3/8, 8/16) provenant de Sétif.
- Ciment CPJ 42.5 provenant de la cimenterie d'Ain EL-kebira Sétif
- L'adjuvant de Granitex: Medaplast **SP30** super plastifiant provenant D'Alger.
- L'ajout : les poudres (calcaire, laitier et verre).
- L'eau de gâchage : eau potable fournie.

III.3 Caractéristiques du sable utilisé

Nous avons utilisé dans ce travail un sable de dune d'origine siliceux qui provient d'OUAD SOUF disponible au niveau des points de vente de matériaux de construction à bba.

III.3.1 analyse granulométrique : (NF P 18 304)

L'essai permet la détermination des grosseurs et des pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon. Il consiste à passer l'échantillon testé à travers une série des tamis décroissants de plus grand à plus petit, et faire peser le refus dans chaque tamis.

III.3.1.1 Matériel pour l'analyse granulométrique

- Une balance de 35000 g,
- étuve pour sécher les matériaux,
- Une série de tamis ou passoires,

- Echantillonneur.



photos III-1: Matériels pour l'analyse granulométrique

III.3.1.2 Mode opératoire:

- Prélever une masse de 1Kg de matériau (sable sec).
- Peser chaque tamis à vide, soit mi la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propre et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimer en mm) [5-2, 5-1,25-0,63-0,315-0,125-0,08-fond].
- Verser le sable sur la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique pendant 10 minutes.
- Peser chacun des tamis.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable d'OUAD SOUF sont regroupés dans le tableau (III.1) ci-dessous :

Tableau (III.1) : Analyse granulométrique du sable

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
5	0	0	0	100
2,5	15,5	15,5	0,63	98,45
1,25	57,5	73	7,3	92,70
0,63	221,33	294,33	29,43	70,57
0,32	424	718,33	71,83	28,17
0,16	224,33	942,66	94,26	5,74
0,08	47,33	989,99	98,99	1,01
fond	3	992,99	99,30	0,7

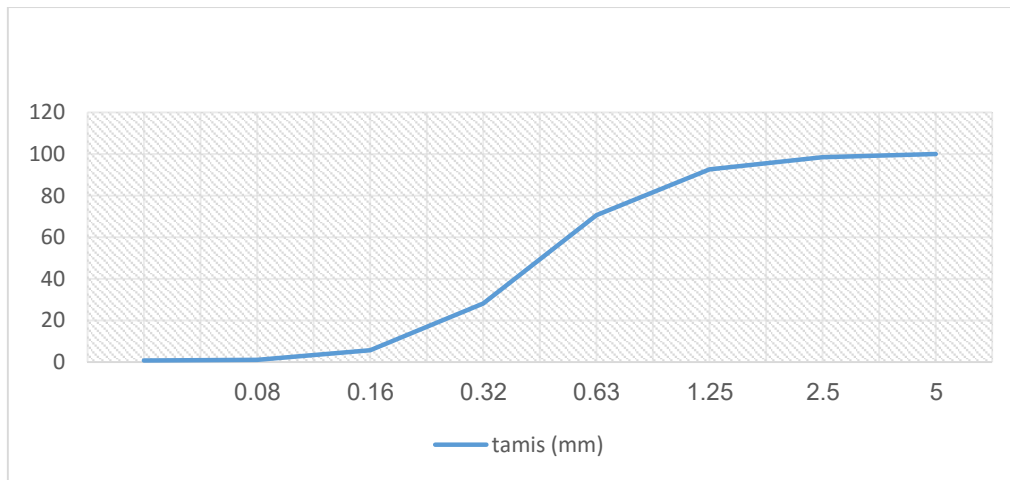


Figure III.2: analyse granulométrique du sable OUAD SOUF

Donc la courbe est bien étalée et continue.

III.3.1.3 module de finesse (NF P 18-540)

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 :

$$Mf = \frac{\sum Rc}{100}$$

Rc: refus cumulé

La norme française donne la classification des sables comme suit :

Tableau III.1: classification des sables en fonction du module de finesse

Qualité du sable	Module de finesse
Sables gros	> 2.5
Sables moyen	$2 < \text{à} < 2.5$
Sables fin	$1.5 < \text{à} < 2$
Sables très fin	$1 < \text{à} < 1.5$

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

Le sable testé a un module de finesse **Mf = 2.04**

Donc Le sable utilisé est considéré comme un sable moyen.

III.3.2 Equivalent de sable

- ✓ IL permet de mesurer la propreté de la quantité d'éléments fins contenus dans le matériau.

- ✓ IL permet de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique, plus l'équivalent de sable est élevé moins le matériau contient des éléments fins nuisibles.

III.3.2.1 Mode opératoire:

- On remplit l'éprouvette de solution lavante jusqu'au trait inférieur.
- A l'aide du récipient de mesure, on introduit une masse sèche de 120 g de matériau dans l'éprouvette par l'intermédiaire de l'entonnoir, on frappe fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air,
- On laisse pendant dix minutes, ensuite on fait agiter l'éprouvette, fermée avec un bouchon en caoutchouc, à l'aide de l'agitateur électrique à raison de 90 cycles en 30 s
- Laver le sable et le bouchon avec précaution jusqu'à atteindre le trait supérieur,
- Laisser reposer pendant 20 minutes,
- Mesure à l'aide d'un réglé la hauteur **h1** (sable + flocculat), et à l'aide de piston la hauteur **h2** (sable).

Et on calcule ESV :

$$Esv = h2/h1 \times 100\%$$

h1 : hauteur entre le niveau supérieur du flocculat et le fond de l'éprouvette.

h2 : hauteur entre le niveau de la couche inférieure et de l'éprouvette.

On détend lentement le piston tare jusqu'à ce que repose sur le sable sédiment, puis on le fixe grâce au manchon, et on retire, après on lit la hauteur h2 au niveau supérieure du manchon.

$$Esp = h'2/h1 \times 100\%$$

Avec : h1 : hauteur du sable plus flocculat

h2 : hauteur du sable

III.3.2.2 Interprétation des résultats :

Tableau III.2 : 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

Tableau III.3 : résultats d'essais d'équivalent de sable.

N° échantillon	1	2	3
h 1	10,6	11,7	10,9
h2	8,5	8,4	8,6
Esv (%)	80,18	71,97	78,89
Esv moy (%)	77,01		
h' 2	8,3	8,4	8,1
Esp (%)	78,30	70,09	74,31
Esp moy (%)	74,23		

Le sable testé donne les résultats suivants :

Esv=77,01 %
argileuses,

Esp= 74,23 %

C'est un sable propre à faible pourcentage de fines

Convenant parfaitement pour les bétons à grande qualité.

III.4 Masse volumique du sable

IL est nécessaire de déterminer toutes les caractéristiques physiques pour le sable. Pour Cela une série d'essais a été effectuée afin de bien caractériser notre sable.

III.4.1 Masse volumique apparente

- ✓ On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2.5l litres.
- ✓ On remplit l'entonnoir avec du sable sec
- ✓ En pèse le récipient vide, 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 :

$$\gamma_{app} = (M2 - M1) / VR \quad (VR = \text{volume de récipient 1L})$$

III.4.2 la Masse volumique absolue (spécifique)

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

On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on verse d'eau, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y excite après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange (sable + eau), soit (v) ce volume.

Donc le volume occupé par le sable c'est :

$$\text{Volume de sable : } V1 = V - V_e$$

La masse volumique absolue du sable et calculée par la formule :

$$P_s = M / V1 \quad M = 300g$$

III.5 Porosité et compacité et l'indice des vides (NF P- 554)

a/ la Porosité par la formule :

$$P = (1 - \rho_{app} / \rho_{abs}) \cdot 100\%$$

b/ la compacité par la formule :

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

c/ l'indice des vides par la formule :

$$E = P / C$$

On note ici que les résultats présentés dans le tableau ci-dessous sont calculés comme moyennes des essais effectués en laboratoire après avoir fait l'échantillonnage.

Tableau III.4 : caractéristiques physiques du sable (OUAD SOUF)

La masse volumique apparente (g/cm ³)	la masse volumique absolue (g/cm ³)	
1,7	2,6	
Compacité (%)	Porosité (%)	L'indice des vides (%)
65,38	26,92	41,17

III.6 caractéristiques des graviers

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

Les fractions des graviers utilisés sont :

- ✓ Fraction 3/8
- ✓ Fraction 8/15

III.6.1 Analyse granulométrique (NF P 18-560)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

La masse utilisée doit répondre au critère suivant :

$$M >_ 0,2D_{max}$$

D: diamètre maximal du gros granulats en mm.

M: la masse de l'échantillon en kg.

Tableau III.5 Analyse granulométrique du gravier 3/8

Poids initial = 1500g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
8	10,33	10,33	0,64	99,95
6,3	263	273,33	17,08	82,92
5	446	719,33	44,96	55,04
4	516,33	1235,66	77,23	22,77
3,15	287,77	1523,32	95,21	4,79
2,5	52,66	1575,98	98,50	1,50
fond	22,33	1597,98	99,87	0,13

Tableau III.6 Analyse granulométrique du gravier 8/16

Poids initial= 3000g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
16	126	126	4,2	99,84
12,5	1002,66	1128,66	37,62	62,38
10	813	1941,66	64,72	22,77
8	566,33	2507,99	83,59	16,73
6,3	380,33	2888,32	96,27	3,73
5	74	2962,32	98,74	1,26
fond	32,66	2994,32	99,81	0,19

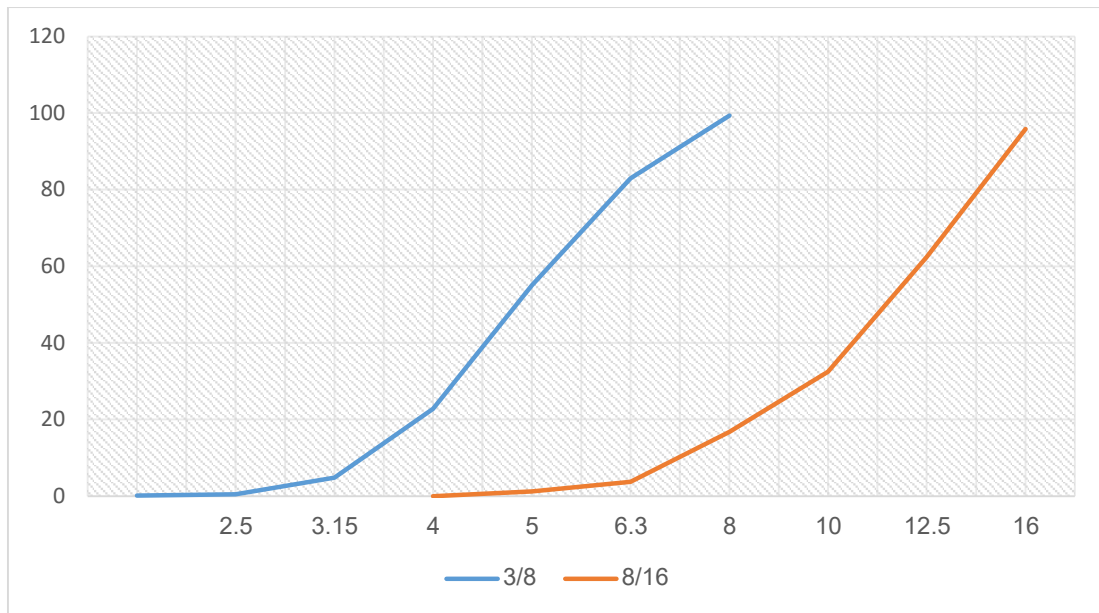


Figure III.3 : courbe granulométrique des granulats concassés (3/8), (8/16).

III.6.2. la masse volumique

On appelle masse volumique d'un corps, la masse de l'unité de volume de ce corps, on distingue :

- Masse volumique apparente : masse de l'unité de volume du corps c'est à dire celle du volume constitué par la matière et les vides qu'elle contient.
- Masse volumique absolue : masse de l'unité de volume d'un corps sans tenir compte les vides qu'elle contient.

Tableau III.7 : la masse volumique apparente des graviers :

Gravier	M2 (g)	M1(g)	V (ml)	P (g/l)	Pmoy (g/ml)
3/8	7550	841	5000	1,34	1,34
	7531			1,33	
	7620			1,35	
8/15	7681			1,36	1,37
	7775			1,38	
	7691			1,37	

Tableau III.8: la masse volumique absolue des graviers

Gravier	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	P (kg/l)	P moy (kg/l)
3/8	300	400	515	2,60	2,54
			520	2,50	
			518	2,54	
8/15			512	2,67	2,60
			515	2,60	
			518	2,54	

III.6.3 Compacité, Porosité et l'indice de vide (NF P 18-554)

Le mode opératoire est semblable à celui effectuée pour le sable on calcule la porosité, la Compacité et L'indice des vides E.

Tableau III.9: Porosité, Compacité, L'indice des vides E

Fraction du gravier	Porosité P (%)	Compacité C (%)	L'indice des vides E
3/8	47,24	52,75	0,895
8/16	47,36	52,70	0,890

III.7. caractéristiques du ciment

III.7.1 présentation du ciment CPJ

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé, obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Le ciment provient de l'usine de Ain-El-Kebira. Le produit a comme identification **PJ-CEMII/A 42, 5**.

C'est un ciment conforme à la norme **NA 442**

III.7.2 Domaine d'utilisation

Le ciment d'Ain-El-Kebira est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques.

Le ciment **CPJ-CEMII/A 42, 5** convient pour :

- Les bétons armés et non armés, préfabriqués ou préfabriqués.
- Les bétons prêts à l'emploi
- Génie civil (ouvrages et routes.)
- Les travaux de construction (logement, locaux commerciaux et industriels) ;
- Les produits dérivés de ciment.
- Les mortiers pour chapes et crépis.

III.7.3 Analyses et caractérisation :

Toute information concernant ces propriétés physiques et sa composition chimique est tirée à partir de la fiche technique d'Ain-El-Kebira deliver du fournisseur et donnée comme suit :

Tableau III.10 : Composition chimique et minéralogique du ciment (cpj)

Composition chimique (%)						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	So ₃	Na ₂ O
20,7	4,75	62,92	3,75	1,9	1,98	0,09

Tableau III.11 : caractéristiques physiques du ciment utilisé

Masse volumique absolue	ps= 3,019 (g/cm ³)
Masse volumique apparente	pa= 0,997 (g/cm ³)
Surface spécifique Blaine	SSB= 3272,81 (g/cm ³)

En conclusion, le produit se présente comme suit :

- **Designation:** ciment Portland composé.
- **Identification:** CPJ-CEMII/A 42,5.
- **Composition :** 80 à 94% de clinker et 6 à 20% d'ajouts.

III.8 caractéristiques des ajouts

Les ajouts que nous avons utilisés sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore dans le ciment.

Les ajouts dont nous traiterons dans cette section sont : le calcaire, le laitier et le verre.

III.8.1 le laitier :

- Densité absolue.....2,665
- Surface spécifique.....4432 (cm²/g)

Composition chimiques moyennes (%):

- SiO₂.....29,04%
- Al₂O₃.....10,06%
- CaO.....31,73%
- MgO.....3,70%
- SO₃.....2,28%
- Fe₂O₃.....0,24%
- Cl.....0,0022%
- K₂O₃.....0,480 %



photo III.4 : laitier de haut fourneau

III.8.2 calcaire

a. Propriétés physiques :

- Masse volumique absolue.....2730 kg/m³
- Surface spécifique.....5095 cm²/g

b. composition chimiques:

- SiO₂.....12,16%
- Al₂O₃.....1,14%
- CaO.....46,69%
- MgO.....0,81%
- So₃.....0,65%
- Fe₂O₃.....0,57%
- Cl.....0,002%
- K₂O.....0.039%



Photo III.5 : le calcaire

III.9 le verre

a. Propriétés physiques :

- La densité.....2,54
- SSB.....4200 cm²/g

b. Propriétés chimique :

- CaO..... 8,92
- Al₂O₃.....0,85
- Fe₂O.....2,03
- SiO₂.....70,26
- MgO.....1,71
- Na₂O.....5,00
- K₂O.....0,58
- SO₃.....0,18



Figure III.6 : poudre de verre

III.10. Les Adjuvants

Les adjuvants sont des produits incorporés au moment du malaxage du béton, pour modifier ou améliorer les propriétés du mélange à l'état frais et ou du durci, (norme EN 934-2).

Dans notre sujet de recherche, nous avons utilisé un type des adjuvants fabriqués par la société Granites à Oued Smar-BP 85 oued smar_16270 (wilaya d'Alger) à savoir :

Medaflo 30 de Granites (super-plastifiant).

III.10.1 Description :

Le Medaflo 30 est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

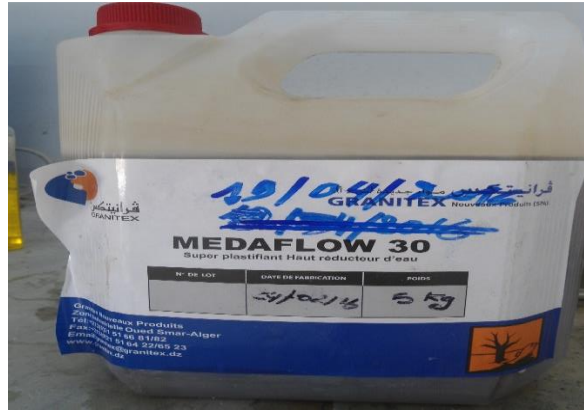


Figure III.7: le super plastifiant MEDAFLOW 30

III.10.2 Caractéristiques :

- Aspect Liquide
- Couleur brun Clair
- PH 6 - 6,5
- Densité $1,07 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 0,1\text{g/L}$
- Extrait sec 30%

III.10.3 Propriétés

Grâce à ses propriétés le Medaflow SP 30 permet :

➤ **Sur béton frais :**

- Améliorer la fluidité.
- Augmenter la maniabilité.
- Obtention d'un rapport E/C très faible.
- Éviter la ségrégation.
- Faciliter la mise en oeuvre du béton.

➤ **Sur béton durci:**

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et a long terme.
- Diminuer la porosité.
- Augmenter la durabilité.
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration.

III.11 l'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est l'eau du robinet de notre Laboratoire. Sa température est comprise entre 18 et 20°C.

III.12 Formulation du béton autoplaçant

Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Évidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais: la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation.

a. Calcule des constituants d'un BAP par la méthode LCPC:

➤ Les données de base :

On a choisi:

- G/S=1

-On fixe le rapport $E/(C+F) = 0,38$.

Le dosage en superplastifiant 1.7% est donné selon la fluidité (donné par l'essai au mini cone), on vise un étalement de 660 à 750mm.

➤ la composition du BAP :

-430 kg/m³ de ciment.

-43 kg/m³ d'ajouts (10% du poids du ciment).

-21.5 kg/m³ d'ajouts (5% poids du ciment).

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

-G/S=1

b. Détermination de la masse de chaque constituant:

On a:

- $E/L = 0,38$ donc $E = 0,38 * (430) = 163,4 \text{ l/m}^3$.

-Volume de granulats égale 630 L.

-G/S=1.

-G+S=630

S=315 l/m³. et G=315 l/m³.

-Le dosage en superplastifiant est 1,7% de la masse ciment et ajout.

SP=0,017*(430). Donc: SP=7,31 kg/m³.

Extrait sec du superplastifiant est de 30%, donc la quantité d'eau provenant de Superplastifiant est de $0,7 \times 7,31 = 5,117$ d'où la quantité d'eau utilisée pour 1m^3 est de $158,283 \text{ l/m}^3$.

➤ **Les masses des constituants pour 1m^3 du BAP:**

On utilise les masses spécifiques des granulats pour déterminer leurs dosages en Kg.

-Eau = $158,283 \text{ l/ m}^3$.

-ajout = 43kg/ m^3 .

-Sable:

$S = 315 \text{ l/m}^3$

La masse volumique absolue égale 2.6

$MS = 315 \times 2,6 = 819 \text{ kg/ m}^3$

-Gravier:

$G = 315 \text{ l/ m}^3$. ($G \text{ 3/8} = 40\%$, $G \text{ 8/16} = 60\%$)

$MG \text{ 8/16} = 189 \times 2,6 = 491,4 \text{ kg/ m}^3$ (La masse volumique absolue égale 2.6)

$MG \text{ 3/8} = 126 \times 2,54 = 320,04 \text{ kg/ m}^3$. (La masse volumique absolue égale 2.54)

-SP=1,7% = 7.31 kg.

Tableau III.12: Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode LCPC

Constituants	Quantité	Unité
Sable	819	kg /m ³
Gravier 3/8	320.04	kg /m ³
Gravier 8/16	491.4	kg /m ³
Ciment	387	kg /m ³
Eau	158,283	l /m ³
Super plastifiant	7,31	kg /m ³
Ajout (10%)	43	kg /m ³

➤ **Composition des 9 éprouvettes cubiques de béton formulé par la méthode LCPC:**

Le moule a un volume de $0,001 \text{ m}^3$ donc les quantités nécessaires pour confectionner neuf éprouvettes sont:

Tableau III.13: Composition des différents bétons pour confectionner 9 éprouvettes cubiques en Kg

Constituants	BAP (10%PC)	BAP (10%PL)	BAP (10%PV)	BAP (5%PC)	BAP (5%PL)	BAP (5%PV)
Sable	7,371	7,371	7,371	7,371	7,371	7,371
Gravier 3/8	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880
Gravier 8/16	4,423	4,423	4,423	4,423	4,423	4,423
Ciment	3.483	3.483	3.483	3.677	3.677	3.677
Ajout	0,387	0,387	0,387	0,1935	0,1935	0,1935
Superplastifiant	0.0658	0.0658	0.0658	0.0658	0.0658	0.0658
Eau	1,425	1.325	1.225	1.375	1.340	1.305

III.13 Méthodes d'essais

III.13.1 les Essais effectués sur la pâte à l'état frais

Les propriétés de la pâte (étalement et degré de saturation en superplastifiant) sont caractérisées à l'aide des essais sur la pâte. L'étalement et le degré de saturation sont déterminés à l'aide de l'essai au mini-cône.

III.13.1.1 Essai d'étalement au mini-cône

Pour les essais sur pâte de ciment relatifs à la détermination d'une formulation de pâte autoplaçante, un mini-cône inspiré du cône d'Abrams et dont les dimensions lui sont proportionnelles a été utilisé (*Figure III.8*) [32], il servira essentiellement à la détermination des diamètres d'étalement sur une plaque métallique horizontale en fonction des paramètres de composition (rapport eau/ciment, taux de substitution du ciment par le filler et superplastifiant), ces diamètres sont mesurés après 1 minute d'étalement, . Les principaux avantages de cet essai sont la facilité de sa mise en œuvre puisqu'il nécessite peu de préparation et une faible quantité de matériaux (volume

inferieur a 40ml). L'essai est utilisé pour la détermination du point de saturation en superplastifiant du mélange cimentaire. Il consiste à remplir le petit cône de pâte, placé sur une plaque à surface propre et humidifiée. Le cône est ensuite soulevé et la pâte en sort en formant une galette qui s'élargit sous son propre poids. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de la pâte, le degré de saturation en superplastifiant est atteint lorsque le diamètre d'étalement reste constant.

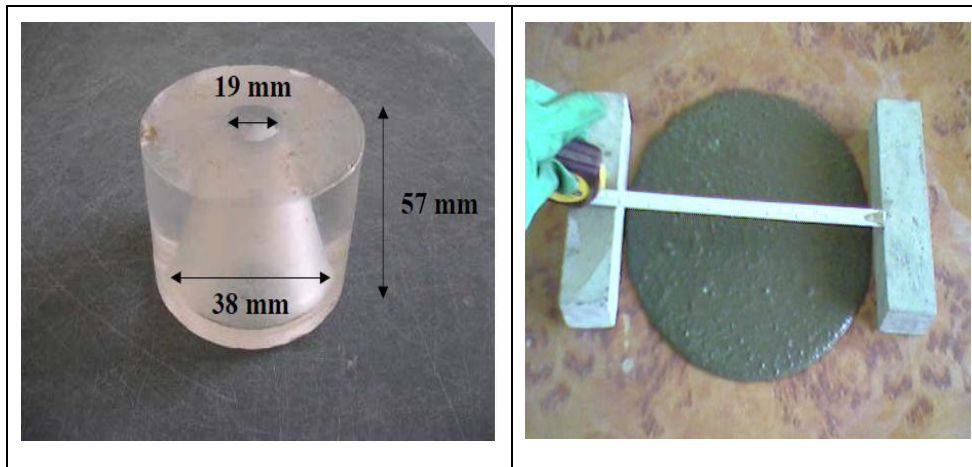


Figure III.8: Essai d'étalement au mini-cône [32].

III.13.2 Procédure de fabrication des éprouvettes

Les éprouvettes ont été fabriquées au laboratoire des matériaux de constructions (MDC) du département de génie civil à l'université de Bordj Bou Arreridj et les tests sont effectués au laboratoire des matériaux de constructions (MDC).

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire, pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

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

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules prismatiques cubiques nécessaires pour les essais, ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, si non les sécher préalablement dans l'étuve.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée, le super plastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.

- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, filler) et les introduire dans le Malaxeur.
- ❖ La fabrication des gâchées est effectuée dans un malaxeur (Figure IV-1) à axe vertical de capacité 20L un mode opératoire strict et identique est suivi:
 - Brassage à sec du mélange sable + Gravier + ciment + filler pendant 30 s
 - Ajout de l'eau + superplastifiant 210 s.



Photo III.10 : Malaxeur à béton laboratoire des (MDC).

- Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration pour le béton autoplaçant.

III.13.3 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais

- 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 à la boîte en L).
 - Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

III.13.3.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (NF EN 12 350-8)

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

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

Constituant un carré d'au moins 90 cm de coté

- Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa base afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur.

- Mètre ou règle de 90 cm.

➤ **Mode opératoire:**

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.

- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).

- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.

- Prélever un échantillon de béton représentatif.

- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône.

- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.

- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesurer le diamètre de la galette.

- Noter le résultat.

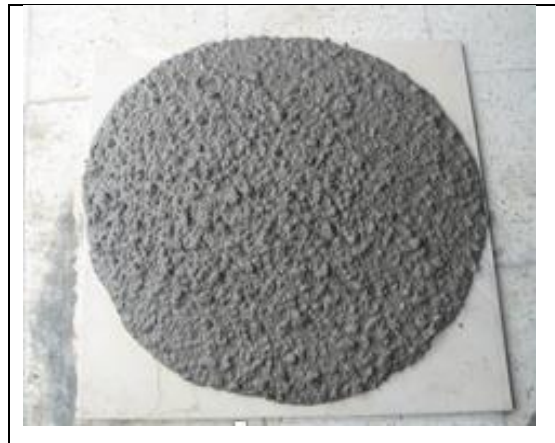


photo III.11: Essais d'étalement

III.13.3.2 Essai de la boîte en L (L-Box)

➤ **Objet de l'essai:**

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation, il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

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



photo III.12: la boîte en L

Mode opératoire:

- Prélever un échantillon de béton représentatif ;
- Remplir entièrement la partie verticale de la boîte en béton en déversant de manière continue (le volume nécessaire est d'environ 13 litres) ;
- Après arasement, laissé le béton reposer pendant une minute ;
- Soulever la trappe verticalement.
- Laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage.
- Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage $H2/H1$.

III.13.3.3 Essai de stabilité au tamis

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

➤ **Matériel utilisé :**

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

➤ **Mode opératoire:**

- Prélever un échantillon de béton de 10 litres juste après le malaxage ;
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation ; Attendre 15 mn ;
- Peser le fond et le tamis à vide ;
- Peser le fond seul ;

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

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



Photo III.13: Essai Stabilité au tamis

- **Critères d'acceptabilité:**
 - $0\% \leq \%P_{\text{laitance}} \leq 15\%$ 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.

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

III.14.1 Essai compression (NF EN 206-1)

Le but c'est de déterminer la résistance à la compression du béton, L'essai se fait sur une éprouvette cubique 10x10x10.

III.13.1.1 Principe de l'essai

- Après malaxage, on remplit en béton un moule cylindrique normalisé, le remplissage du moule se fait en 3 couches bien vibrées chacune.
- L'éprouvette sera immergée dans un bac d'eau pour durcir à une température moyenne de 20 C°.
- Le démoulage se fera après un 24 heures. La résistance est déterminée à 7 jours, 14 jours et a 28 jours.



Photo III.14: Presse hydraulique de compression.

III.14.1.2 Conduite de l'essai

- Ce temps écoulé, on retire le moule et on fait passer l'éprouvette à la presse permet la lecture de la force qui s'exerce sur les facettes latérales du cylindre de béton.
- Eprouvette sera placée entre les deux mâchoires de la machine et on élèvera une seule lecture.

Celle de la force correspondant à la rupture de l'échantillon. Soit F cette lecture.

Calculs:

La résistance sera: $G = F/S$

- S: section de l'éprouvette: 100 cm².
- F: force au moment de la rupture.

III.14.2 Essais traction par flexion (NF P 18-408)

- **But de l'essai:**

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

- **Conduite de l'essai:**

Lors d'un essai de flexion trois points, la poutre de béton est soumise dans sa partie supérieure à des contraintes de compression et dans sa partie inférieure à des contraintes de traction. Compte tenu que le béton résiste beaucoup moins à la traction qu'à la compression.

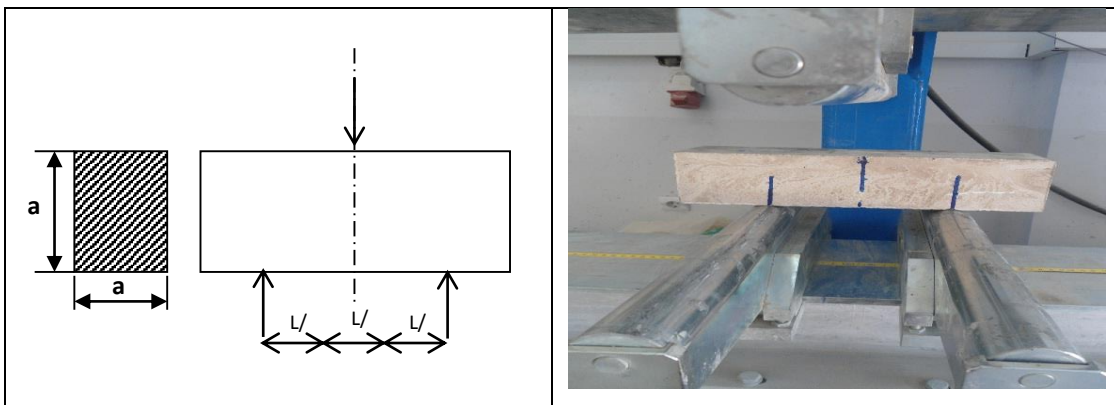


Figure III.15: Essai de flexion en trois points

La résistance à la traction par flexion est calculée donc par la formule suivante:

$$F_{cf} = \frac{2d_1d_2}{3L} F$$

F_{cf}: la résistance en flexion en MPa

F: la charge maximale en newtons;

L: L'écartement entre les deux rouleaux d'appui en millimètres;

d₁ et **d₂** sont les dimensions de la section transversal de l'éprouvette; en millimètres;

III.15.le milieu agressif

L'objectif de cette étude est très important, il vise à proposer des formulations de BAP durables vis-à-vis de l'attaque de HCl. et pour étudier la résistance d'un BAP vis-à-vis de l'attaque des acides.

Pour la caractérisation de la résistance vis-à-vis des attaques chimiques ainsi que la dégradation, des éprouvettes cubique ont été confectionnées, démoulées à 24 heures, et conservées dans l'eau pendant 28 jours.

Les éprouvettes en béton pour les deux pourcentages d'ajouts 10% et 5% sont immergées dans l'eau dosée à 14 % de solutions acides HCL sa concentration est de 5% , pendant 15 jours.

La résistance aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions est vérifiée par leur perte de poids.

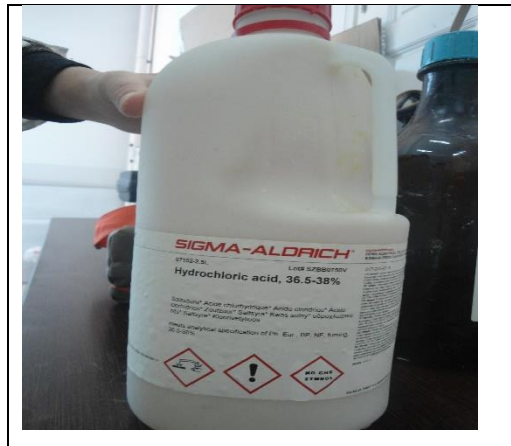


Photo III.16: solution acide HCl

III.16 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté et analysé les résultats de caractérisation des matériaux employés pour la préparation du béton autoplaçant avec ajouts.

Les résultats nous ont montré les principales caractéristiques physico-chimiques et mécaniques nécessaires pour entamer le programme expérimental.

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale, dans laquelle nous présentons les matériaux, le matériel utilisé dans notre travail et les essais qui ont été effectués dans laboratoire, la méthode utilisée est la méthode dite " LCPC", utilisée pour le calcul des masses des composantes du béton autoplaçant.

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



CHAPITRE IV
Résultats et discussion

IV.1 Introduction

Cette étude a pour objectif d'évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton autoplaçant à base des ajouts (calcaire, laitier et le verre); avec différents pourcentages 5%, 10% afin de voir l'influence de la nature, et le pourcentage d'ajout sur les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci, ainsi que l'influence du milieu agressif (HCl) sur le BAP.

IV.2 Détermination du dosage en superplastifiant

Pour déterminer le dosage de la teneur en superplastifiant sur la pâte à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement (mini cône), en fonction du dosage en SP, avec un rapport E/C de 0.38 jusqu'à une valeur d'étalement constante où la pâte atteint un degré de saturation en SP.

Tableau IV-1: variation de diamètre en fonction du dosage en SP

	Pate 1	Pate 2	Pate 3	Pate 4
Dosage en superplastifiant %	1.4	1.6	1.7	1.8
Etalement (cm)	15.5	19	23	23

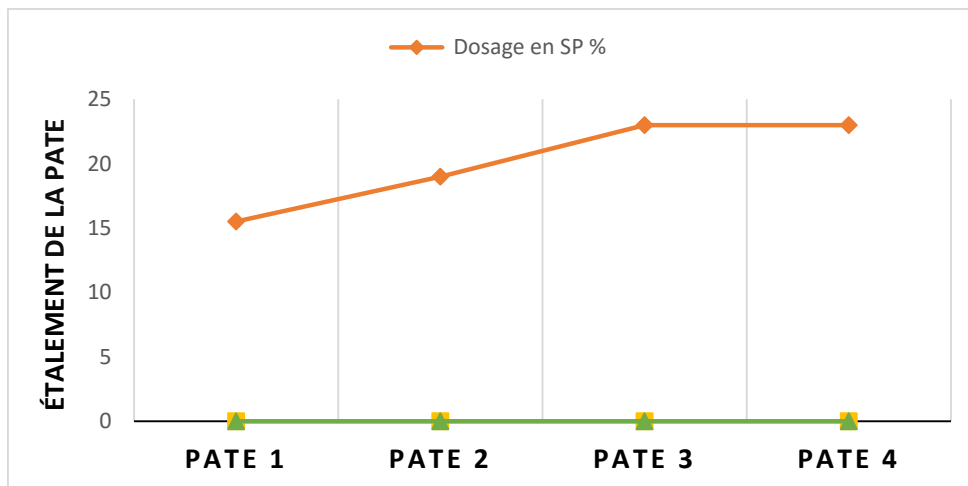


Figure IV-1: la variation du diamètre d'étalement (mini cône), en fonction du dosage en SP

D'après le tableau et la Figure, on constate que le diamètre d'étalement est proportionnel à la teneur en superplastifiant jusqu'au dosage de 1.7% après lequel l'étalement de la pâte reste constant. Donc le dosage idéal en SP c'est 1.7%.

IV.3 Le béton autoplaçant à l'état frais

Des essais sont effectués sur des mélanges de BAP frais avec substitution de (5%, 10%) des ajouts en vue d'évaluer les caractéristiques rhéologiques du BAP.

IV.3.1 .différents BAP à base des ajouts (pourcentages de 5%)

BAP+PC \longrightarrow béton autoplaçant avec l'ajout de poudre de calcaire.

BAP+PL \longrightarrow béton autoplaçant avec l'ajout de poudre de laitier.

BAP+PV \longrightarrow béton autoplaçant avec l'ajout de poudre verre.

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant:

Tableau IV-2 : Caractéristiques rhéologiques des différents BAP avec 5% ajout

TYPE DE BETON	CARACTERISTIQUES		
	Etalement (cm)	Stabilité au tamis(%)	Boite en L
BAP+PC	66	13,55	0,80
BAP+PL	68	14,28	0,82
BAP+PV	69	14,85	0,84

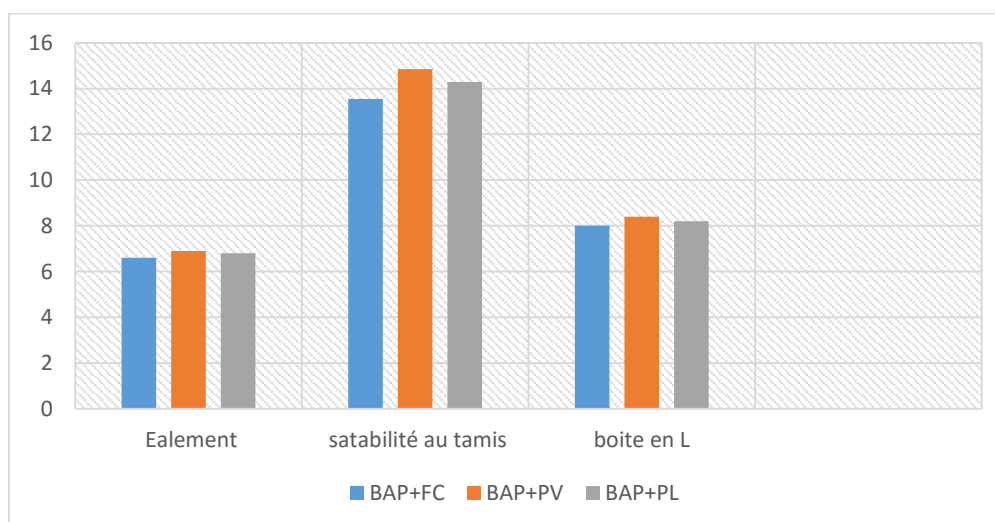


Figure IV-2: Caractéristiques rhéologiques du différent BAP avec 5% d'ajout

IV.3.2 Différent BAP à base des ajouts (pourcentages de 10%)

Tableau IV-3 : Caractéristiques rhéologiques des différents BAP avec 10% d'ajouts

TYPE DE BETON	CARACTERISTIQUES		
	Étalement (cm)	Stabilité au tamis(%)	Boîte en L
BAP+PC	65	13,22	0,80
BAP+PL	67	14,54	0,82
BAP+PV	70	14,89	0,86

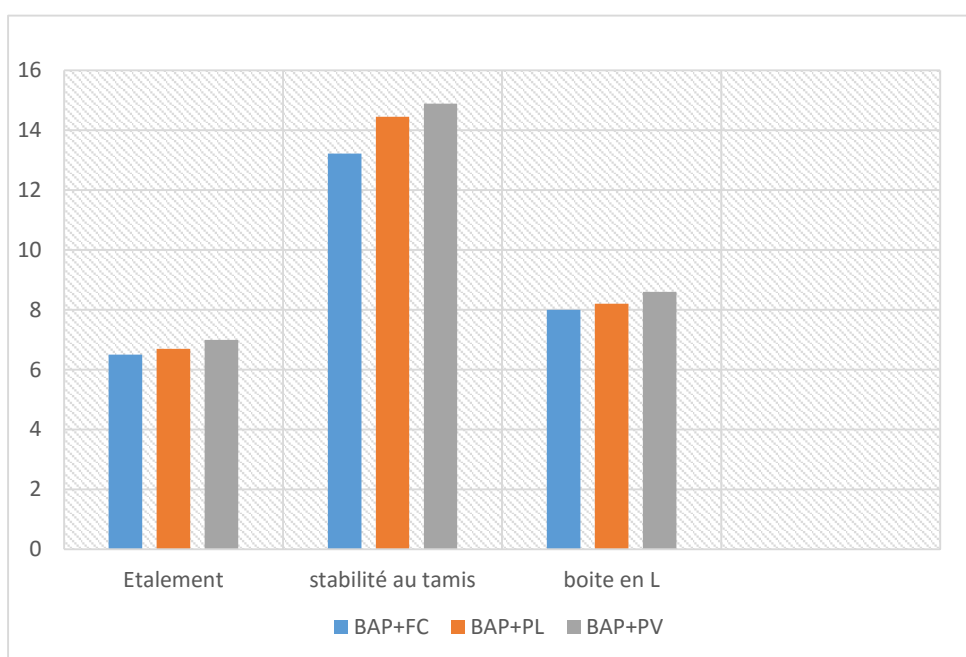


Figure IV-3: Caractéristiques rhéologiques des différents BAP avec 10% ajouts

Les tableaux et les figures ci-dessus présentent les caractéristiques rhéologiques d'un BAP avec ajouts avec un pourcentage de 5% et 10% en volume pour la formulation du béton autoplaçant.

On peut constater que les bétons autoplaçants avec ajouts respectent le critère d'étalement (compris entre 60 et 75 cm), on a obtenu un très bon étalement avec une meilleure capacité de remplissage (boîte en L) béton homogène.

Tous nos bétons ont présenté une bonne stabilité au tamis, pas de ségrégation statique; en effet, la quantité de laitance et situé dans le domaine de BAP soit inférieur à 15% pour tous les BAP validés. Stabilité satisfaisante.

Les caractéristiques à l'état frais de notre BAP, ont répondu aux exigences de norme des différents essais effectués précédemment.

Ces propriétés sont liées au rôle du superplastifiant qui a une action de défloculation et dispersion des grains du ciment qui sont directement liées à l'adsorption de polycarboxylates à la surface des particules en évitant l'agglomération et libérant l'eau emprisonnée dans ces agglomérats [60].

IV.4 Le béton autoplaçant à l'état durci

Dans cette étude nous avons suivi l'évaluation des résistances mécaniques (compression, traction) du BAP.

IV.4.1 la résistance à la compression (NF P 15-471)

L'essai de compression est l'essai le plus couramment pratiqué. Il s'effectue sur des éprouvettes cubiques (10x10x10) durant les dates suivantes: 7,14 et 28 jours.

IV.4.1.1 Effet de laitier

Les résultats de la résistance en compression des éprouvettes de BAP avec le laitier sont regroupés dans le tableau IV-4 pour les taux de substitution 5% et 10%.

Tableau IV-4: la résistance à la compression du BAP avec laitier

Type de béton	la résistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BAP+PL 5%	39,21	47,65	54,86
Densité	2.34	2.41	2.42
BAP+PL 10%	43,85	51,79	66,54
Densité	2.39	2.43	2.46

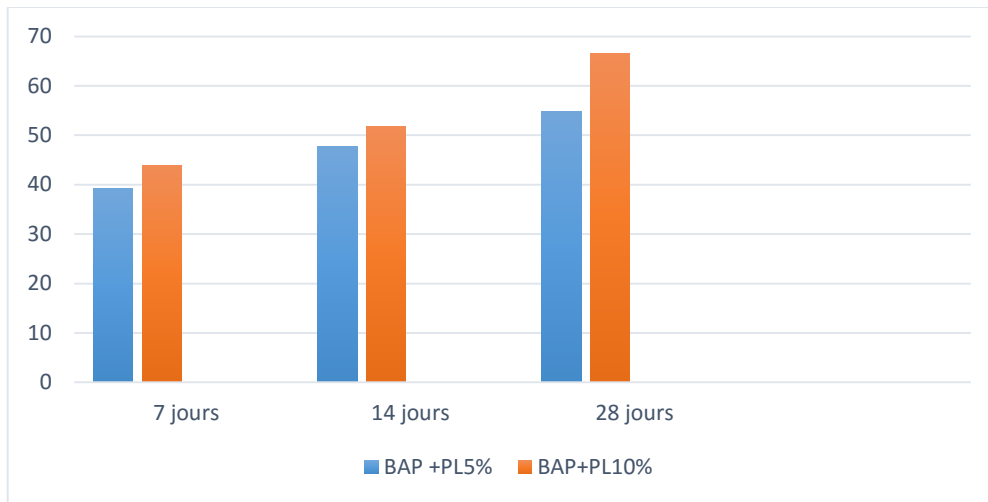


Figure IV-4: la variation de la résistance à la compression des différents âges du BAP en fonction du pourcentage (5%,10%) de laitier

- **Analyse des résultats**

Le tableau et la figure ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP à base de laitier, avec différents taux de substitution 5% et 10%,

D'après les résultats inscrites dans le tableau et la figure ci-dessus, on trouve une légère amélioration de résistance à la compression de l'ordre de 8.2% dans la formulation contenant 10% laitier, et cet variation dans les premiers 14 jours.

A l'âges de 28 jours, on remarque une augmentation importante de la résistance à la compression de l'ordre de 18% dans le BAP contenant 10% de laitier.

Donc les différents taux de substitution jouent un rôle important dans la performance mécanique des bétons autoplaçants qui est plus importante avec le taux de substitution de 10%.

IV.4.1.2 Effet de calcaire

Les résultats des résistances à la compression des éprouvettes de BAP avec calcaire sont récapitulés dans le tableau IV-4 pour les taux de substitution de 5% et 10%.

Tableau IV-5: la résistance à la compression du BAP avec le calcaire

Type de béton	la résistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BAP+PC 5%	48,69	59,42	65,12
Densité	2.42	2.45	2.46
BAP+PC 10%	50,84	68,67	75,24
Densité	2.425	2.47	2.51

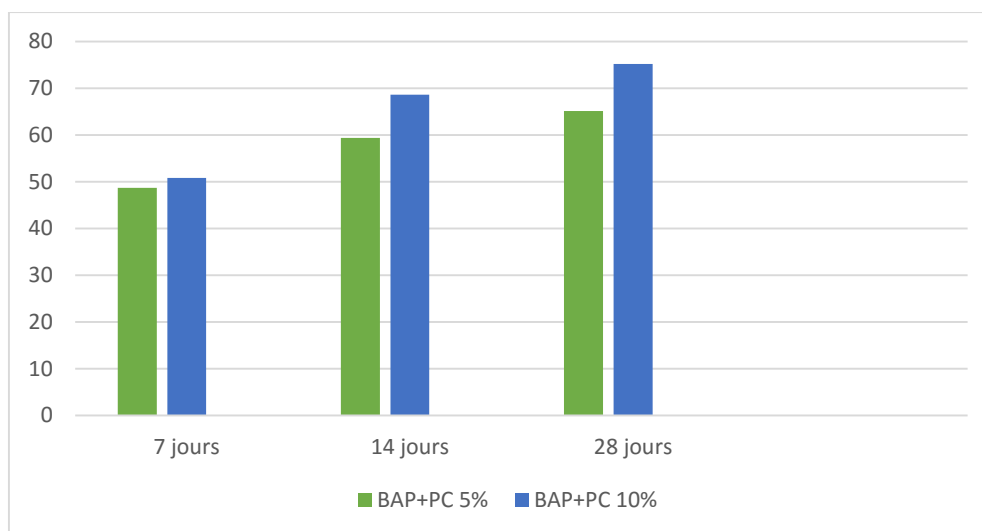


Figure IV-5: variation de la résistance à la compression des différents âges du BAP en fonction du pourcentage (5%,10%) de calcaire.

- **Analyse des résultats:**

Le tableau et la figure ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP avec l'ajout de calcaire, avec différents taux de substitution 5% et 10%,

D'après les résultats inscrites dans le tableau et les figures ci-dessus, on trouve une légère amélioration de résistance à la compression de l'ordre de 4.15% dans la formulation contenant 10% de calcaire à l'âge de 7 jours

A partir de 7 jours, on remarque une amélioration remarquable de la résistance à la compression.

Donc le taux de substitution de 10% est le plus favorable que 5% par rapport au performance mécanique du BAP.

IV.4.1.3 Effet de verre:

Les résultats de la résistance mécanique à la compression des éprouvettes de BAP à base de verre sont regroupés dans le tableau IV-6 pour les taux de substitution de 5% et 10%.

Tableau IV-6: la résistance à la compression du BAP à base de verre

Type de Béton	la résistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BAP+PV 5%	50,55	65,75	69,52
densité	2.4	2.45	2.47
BAP+PV 10%	53,26	72,55	79,62
Densité	2.43	2.52	2.55

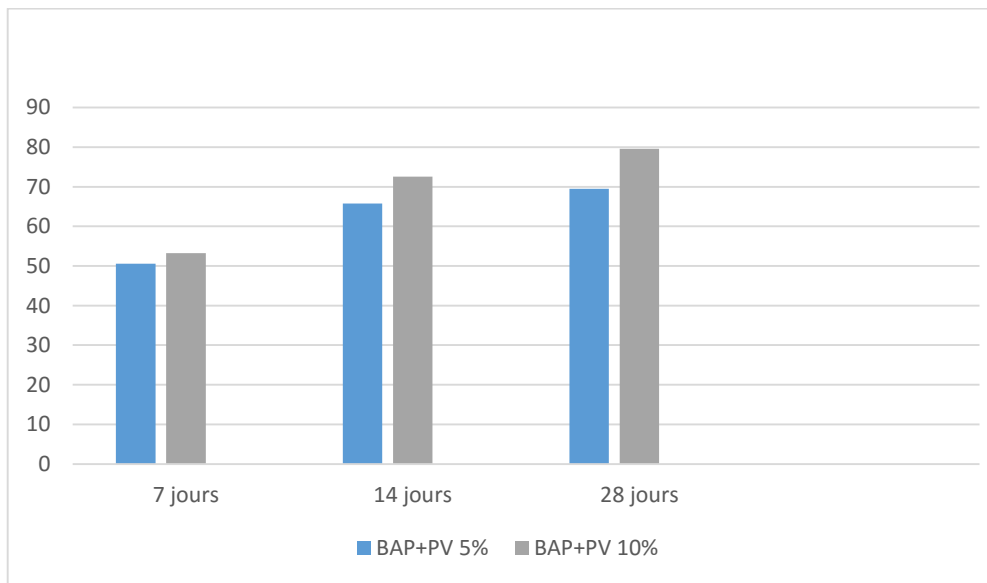


Figure IV-6: variation de la résistance à la compression des différents âges de BAP en fonction du pourcentage (5%,10%) de verre

- **Analyse des résultats**

Le tableau et la figure ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques des différents âges de BAP en fonction du pourcentage (5%,10%) de verre;

D'après les résultats mentionnés dans le tableau et la figure ci-dessus on trouve une légère amélioration de résistance à la compression de l'ordre de 5% dans la formulation contenant 10% de verre à l'âge de 7 jours

A partir de 7 jours, on remarque une amélioration remarquable de la résistance à la compression.

Donc le taux de substitution 10% est plus favorable que 5%, pour la performance mécanique du BAP.

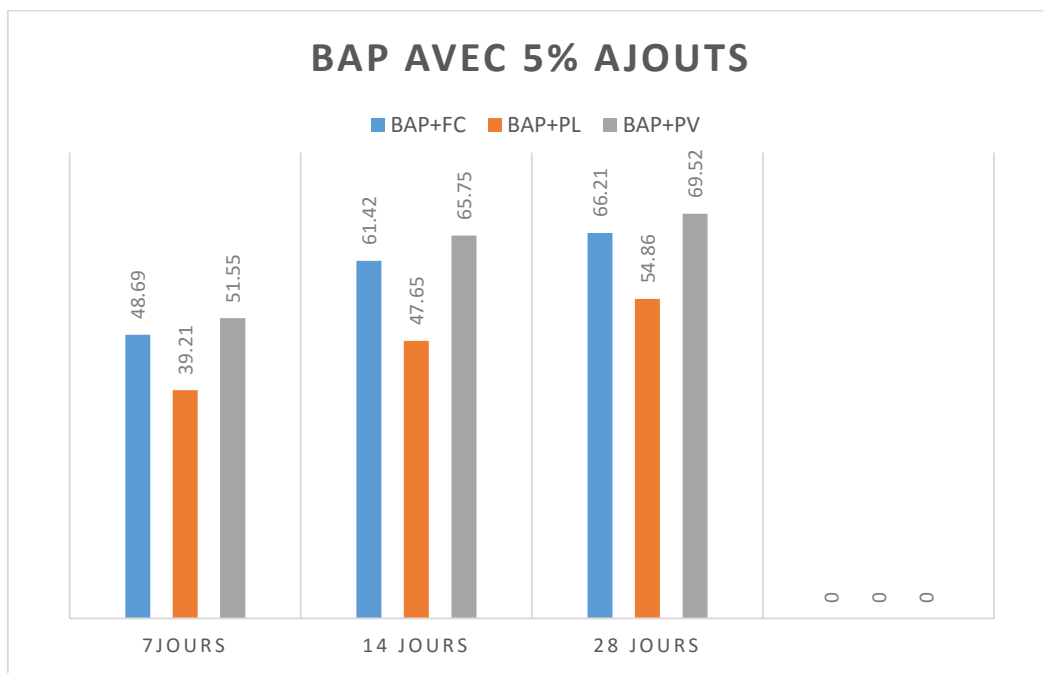


Figure IV-7: Résistance à la compression des différents BAP à différents âges étudiés avec 5% ajouts

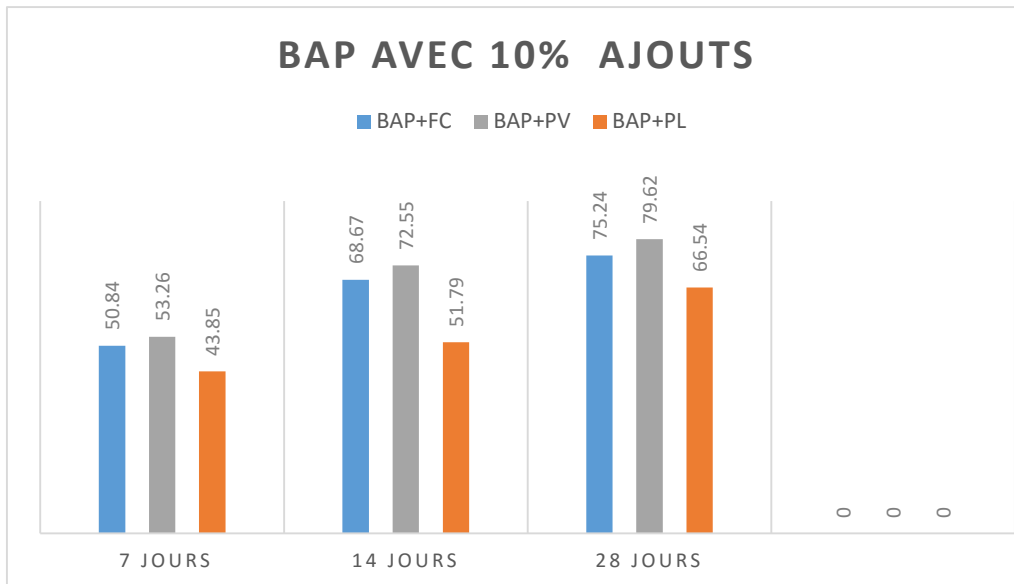


Figure IV-8: Résistance à la compression des différents BAP étudiés à différents âges avec 10% ajouts

- **Analyse des résultats**

Les figures ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques des différents BAP (BAP+PC, BAP+PL, BAP+PV) avec différents taux de substitution (5%, 10%),

D'après les résultats obtenus dans les figures ci-dessus, nous remarquons que l'utilisation d'un pourcentage des ajouts élevé améliore les propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant où nous avons trouvé pour le pourcentage de 10% d'ajouts de verre une amélioration de la résistance à la compression par rapport aux autres ajouts.

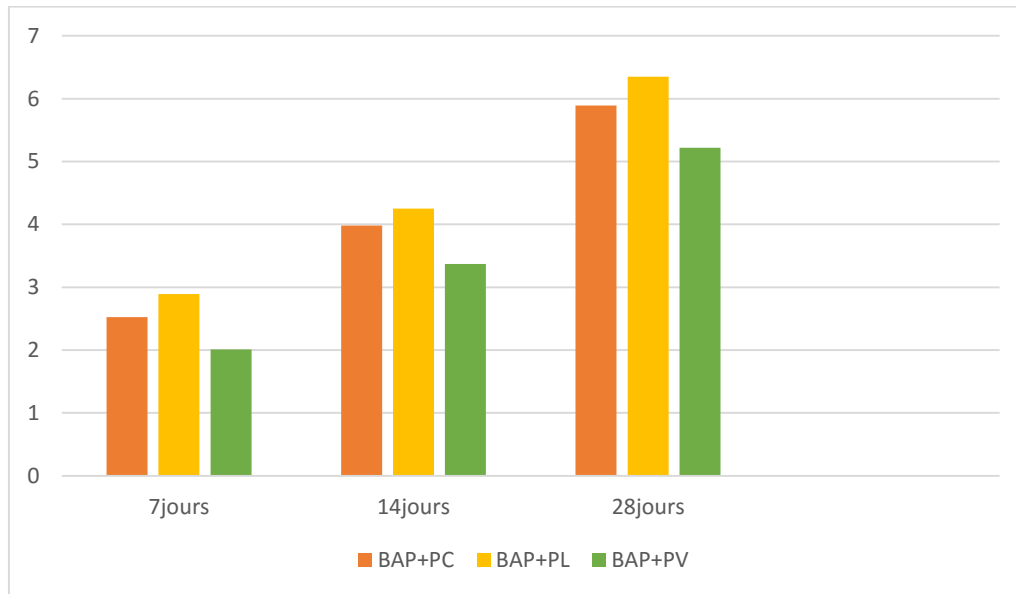
Nous concluons que le pourcentage influe sur les propriétés mécaniques du béton autoplaçant notant que la performance du béton autoplaçant de 10% d'ajouts mieux qu'à un pourcentage de 5% particulièrement dans le cas de verre.

IV.4.2 la résistance à la traction

Les résultats de résistance à la traction des éprouvettes prismatiques (7x7x28) de BAP avec ajouts sont récapitulés dans le tableau IV-7 et le tableau IV-8 pour les taux de substitution de 5% et 10%.

Tableau IV-7: la résistance à la traction des différents BAP avec 5% d'ajouts

Type de béton	la résistance à la traction (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BAP +PC	2,525	3,98	5,89
BAP+PL	2,891	4,25	6,35
BAP+PV	2,012	3,78	5,22

*Figure IV-9: Résistance à la traction des différents des différents âges du BAP étudié avec 5% ajouts*

- **Analyse des résultats**

Le tableau et la figure ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP pour la Résistance à la traction des différents BAP ont étudié avec 5% d'ajouts

L'ajout influe positivement sur sa résistance à la traction où nous remarquons d'après les résultats obtenus que le laitier améliore la résistance de BAP par rapport au verre et au calcaire.

Alors on peut conclure que la performance du béton autoplaçant avec l'ajout de laitier est mieux qu'un BAP avec le calcaire et le verre.

Tableau IV-8: la résistance à la traction des différents âges du BAP avec 10% d'ajouts

Type de béton	la résistance à la traction (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BAP +PC	2,888	4,218	6,75
BAP+PL	3,040	5,255	7,76
BAP+PV	2,442	4,02	6,11

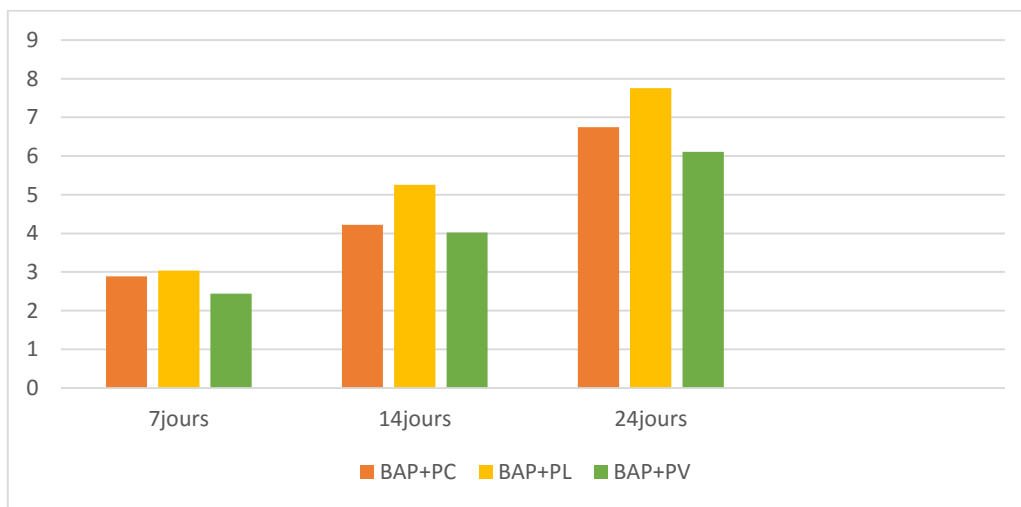


Figure IV-10: Résistance à la traction des différents BAP étudié avec 10% d'ajouts

- **Analyse des résultats:**

Le tableau et la figure ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP pour la Résistance à la traction des différents BAP étudiés avec 10% d'ajouts.

D'après les résultats inscrites dans le tableau et la figure ci-dessus, on trouve une légère amélioration de résistance à la traction dans la formulation contenant 10% de calcaire par rapport à celle contenant 10% de verre;

Par contre on remarque une amélioration remarquable de la résistance à la traction dans la formulation contenant 10% de laitier.

Donc la performance mécanique du BAP avec l'ajout de laitier est plus satisfaisante que celle du verre et le calcaire.

IV.5 Milieu agressif

IV.5.1: La chute de la résistance:

Les résultats de la résistance mécanique des éprouvettes cubiques de BAP avec ajouts émergées dans la solution HCl sont regroupés dans le tableau **IV-9** pour le taux de substitution de 5%.

Tableau IV-9: la chute de résistance des différents bétons à différents âges avec 5% ajouts

Type de béton	Résistance à 28j avant émerision	Résistance à 15j après émerision	La Chute (%)
BAP+PL	54.86	38.56	29.71
BAP+PC	65.12	47.63	26.85
BAP+PV	69.52	37.25	46.42

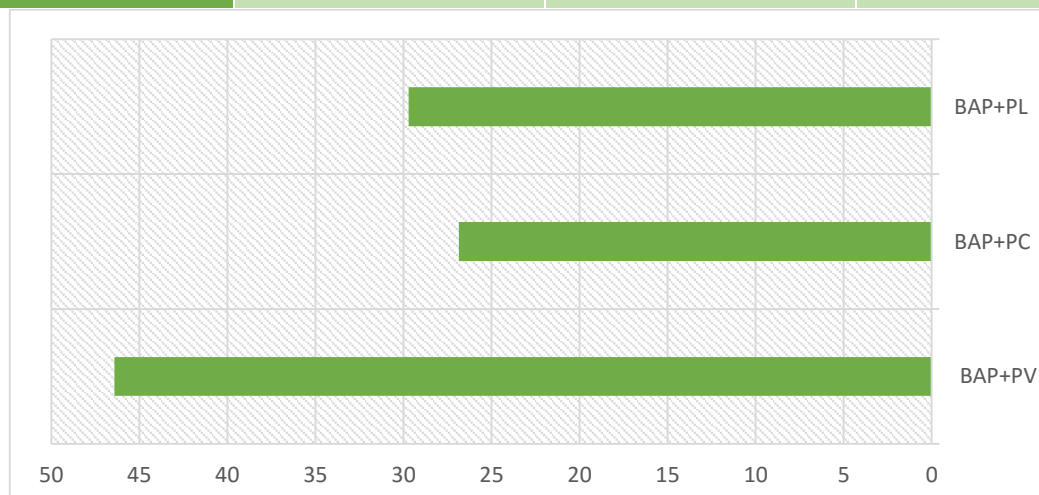


Figure IV-11: la chute de résistance à la compression des différents bétons étudiés avec 5% d'ajouts

- **Analyse des résultats**

Le tableau IV-9 et la figure IV-10 ci-dessus présentent les chutes de la résistance des différents bétons étudiés à base de 5% d'ajouts (verre, calcaire, laitier) immergés dans une solution agressive (HCl).

On remarque une chute très importante de la résistance à la compression d'ordre 46.42% dans la formulation de BAP contenant 5% de verre, concernant les autres ajouts il ya une légère chute de la résistance dans formulation contenant le calcaire d'ordre 26.85% et 29.71% dans la formulation contenant le laitier.

Alors le calcaire et le laitier résistent mieux dans le milieu contenant le HCl.

Donc la détérioration de la résistance mécanique des éprouvettes immergées dans le milieu agressif, est due à l'attaque chimique du HCl.

Tableau IV-10: la chute de résistance à la compression des différent BAP avec 10% ajouts

Type de béton	Résistance à 28j avant émerision	Résistance à 15j Après émerision	La Chute (%)
BAP+PL	66.54	54.74	17.73
BAP+PC	75.24	59.81	20.51
BAP+PV	79.62	48.04	39.66

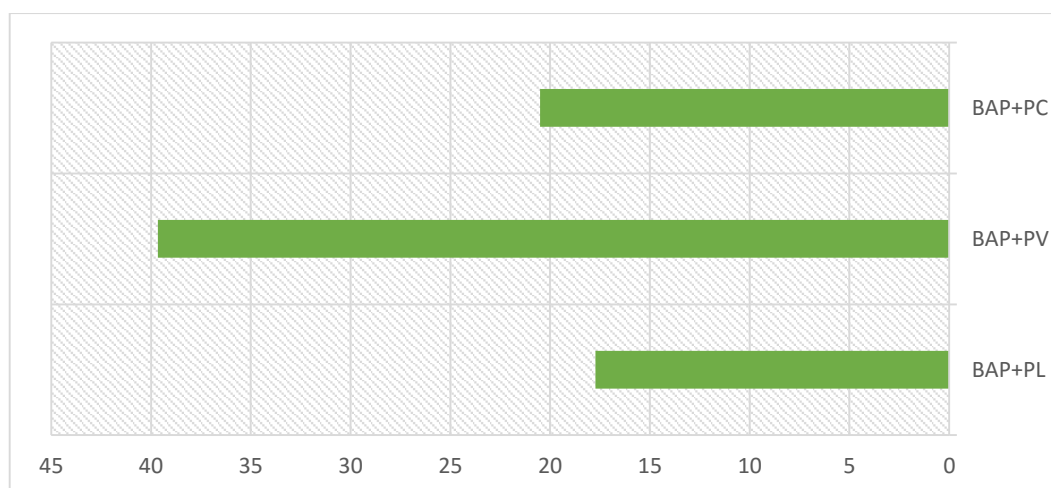


Figure IV-12: variation de chute de résistance à la compression des différents âges de BAP en fonction du pourcentage d'ajouts 10%

• Analyse des résultats

Le tableau IV-10 et la figure IV-11 ci-dessus présentent les chutes de la résistance des différents betons étudiés à base de 10% d'ajouts (verre, calcaire, laitier) immergés dans une solution agressive (HCl).

On trouve une chute tres importante de la résistance à la compression d'ordre 39.66 % dans la formulation de BAP contenant 10% de verre, concernant les autres ajouts il ya une légère chute de la résistance dans la formulation contenant le calcaire d'ordre 20.51% et 17.73% dans la formulation contenant le laitier.

On conclue que le laitier résiste mieux à l'attaque chimique de HCl paraport au verre et le calcaire.

Les taux de substitution jouent un rôle très important dans la résistance au milieu agressif, c'est le cas de 10%.

IV.5.2: la perte de masse

Les résultats de perte de masse des éprouvettes cubiques de BAP avec ajouts émergées dans la solution HCl sont regroupés dans le tableau IV-11 pour le taux de substitution de 5%.

Tableau IV-11: la perte de masse des différents BAP étudiés avec 5% ajouts

Type de béton	La Masse initial Avant émerision (g)	La masse après 15j dans le HCl (g)	Perte de masse (%)
BAP+PL	2423	2346	3.17
BAP+PC	2448.5	2398	2.06
BAP+PV	2435.5	2306	5.32

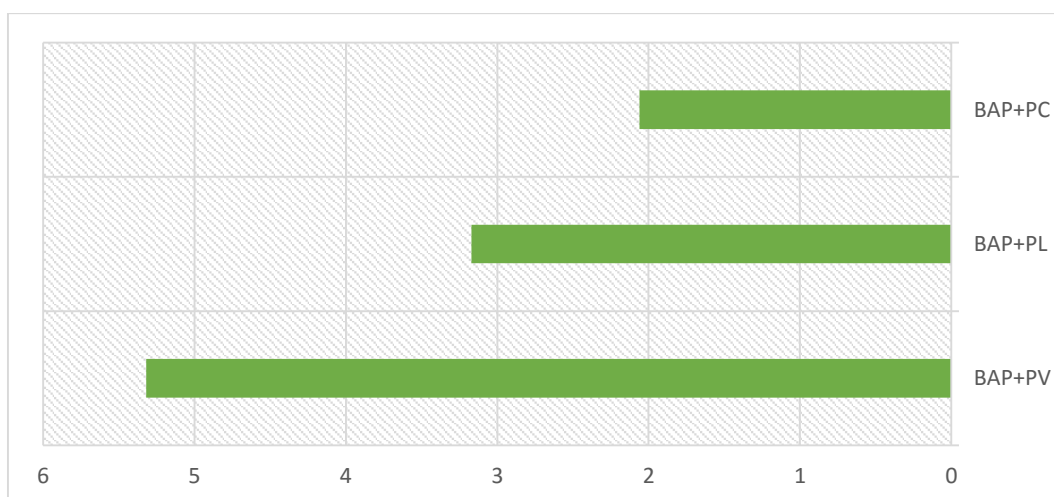


Figure IV-13: variation de perte de masse des différents âges de BAP étudiés en fonction de pourcentage d'ajouts 5%

- **Analyse des résultats**

Le tableau et la figure ci-dessus présentent la variation de perte de masse des différents BAP étudiés en fonction de temps et de pourcentage d'ajouts 5% immergés dans la solution à base d'acide chlorhydrique HCl.

Il est clair que plus la perte de masse est petite plus le béton résiste mieux au milieu agressif.

C'est le cas de BAP à base de calcaire, on remarque qu'il y a une perte de masse très petite (2.06%) par rapport aux autres bétons à base de laitier (3.17 %) et de verre (5.32 %).

On conclue que la résistance du béton au milieu agressif est proportionnelle à la perte de masse.

Les résultats de perte de masse des éprouvettes cubiques de BAP avec ajouts émergé dans la solution HCl sont regroupés dans le tableau **IV-12** pour le taux de substitution de **10%**.

Tableau IV-12: la perte de masse des différents BAP étudiés avec 10% d'ajouts

Type de béton	La masse initiale avant émerision (g)	La masse après 15j dans le HCl (g)	La perte de masse (%)
BAP+PL	2441	2376	2.66
BAP+PC	2505	2401	4.15
BAP+PV	2479	2319	6.45

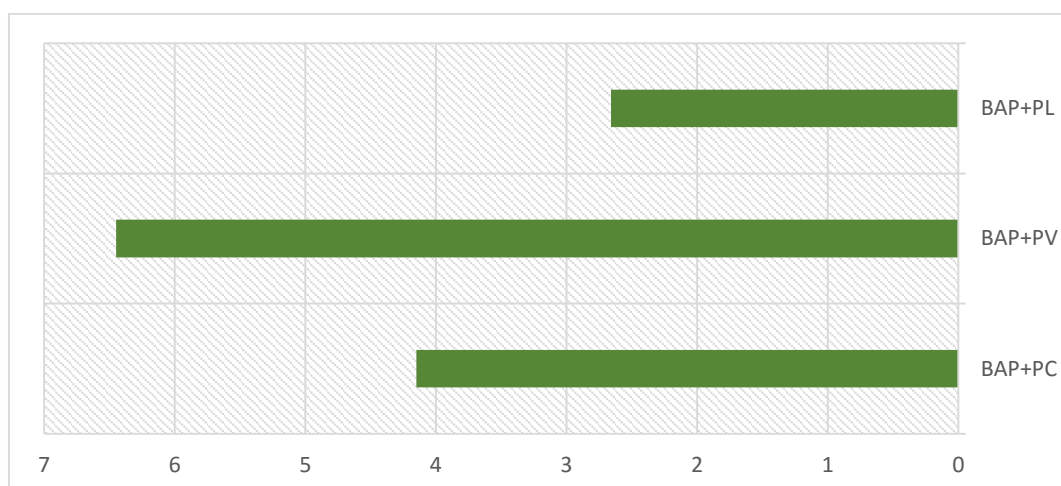


Figure IV-14: la perte de masse des différents BAP étudiés avec 10% d'ajouts

• Analyse des résultats

Le tableau et la figure ci- dessus présentent la variation de perte de masse des différents âges BAP étudiés en fonction de pourcentage d'ajouts 10% immergés dans la solution à base d'acide chlorhydrique HCl.

Il est clair que plus la perte de masse est petite plus le BAP résiste mieux aux milieu agressif.

C'est le cas de BAP à base de laitier, on remarque qu'il ya une perte de masse très petite (2.66%) paraport aux autres BAP à base de verre (6.45 %) et de calcaire (4.15 %).

On conclue que la résistance du BAP au milieu agressif est proportionnelle à la perte de masse.

IV. 6 Conclusion

Les résultats des différents essais ont montré que le taux de dosage et la nature d'ajouts jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques du béton autoplaçant notant que la performance du béton autoplaçant avec le taux de substitution de 10% est plus favorable qu'à 5%. La résistance à la compression du BAP avec la poudre de verre mieux qu'un BAP avec calcaire et laitier. par contre à la résistance à la traction, le laitier résiste mieux que les autres ajouts.

La résistance du BAP au milieu agressif est proportionnelle à la perte de masse, le laitier et le calcaire résiste mieux à l'attaque chimique de HCl par rapport au verre.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

L'influence de taux de substitution et la nature des ajouts sur les propriétés mécaniques et rhéologiques ont été étudiées en premier lieu en composant de BAP avec différents dosages d'ajouts (calcaire, laitier et verre) et en sélectionnant deux dosages (5%, 10%) pour chaque type.

Les résultats expérimentaux de cette étude, montrent qu'un (BAP + la poudre de verre) a permis d'obtenir les meilleures comportements à la résistance à la compression que le calcaire et le laitier tel qu' il atteint 79.62 MPa à 28 jours.

Par contre le laitier à une bonne résistance à la traction estimée par 7.76 MPa à 28 jours.

Les bétons préparés avec un taux de substitution de 10% présentent les meilleures caractéristiques rhéologiques, mécaniques et une bonne résistance au milieu agressif.

A l'issue de cette étude nous tirons les conclusions suivantes :

1. L'utilisation d'un superplastifiant a permis d'avoir d'excellentes propriétés rhéologiques des BAP ainsi que l'amélioration des résistances mécaniques avec un rapport $E/(C+F) = 0.38$ plus faible .
2. L'emploi des ajouts dans les BAP permet également d'améliorer les propriétés mécaniques dans le cas de verre (la résistance à la compression) et de laitier (la résistance à la traction).
3. La méthode de formulation LCPC par sa simplicité dans l'application (exige moins de compétence et de matériels) a prouvé son efficacité pour la formulation des BAP avec des ajouts. avec l'obtention de meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques. Elle peut être donc utilisée comme une méthode principale dans la formulation des BAP à base des matériaux locaux.
4. On peut incorporer des ajouts dans le béton autoplaçant sans détérioration de ses propriétés rhéologiques mais à des teneurs différentes.
5. La poudre de verre améliorent les propriétés des BAP à l'état frais et durci et donnent des meilleurs résultats : (l'étalement (70 cm), la boîte en L (0.86), la résistance à la compression) par rapport aux calcaire et le laitier.

Conclusion générale

6. Les résultats tirés de nos essais expérimentaux (essai de traction) montrent qu'à un dosage de 10%, les laitier ont donné des meilleurs résultats par rapport aux calcaire et de verre.
7. Pour l'influence du pourcentage des ajouts et d'après les résultats, on observe avec l'augmentation du dosage d'ajout dans les bétons une augmentation dans les propriétés rhéologiques de l'ordre de 1.5 %, l'utilisation des ajouts influe positivement sur le BAP et on a une augmentation de la résistance à la compression et à la traction.
8. La détérioration de la résistance mécanique des éprouvettes immergées dans le milieu agressif, est due à l'attaque chimique du HCl, tels que le laitier et le calcaire qui résistent plus que le verre.

Si le milieu du BAP est fortement agressif avec une source de renouvellement de l'acide chlorhydrique, l'attaque serait très nuisible, plus la perte de masse est petite plus le béton résiste mieux au milieu agressif.

Notre étude pratique nous a permis de mettre au point la formulation, la caractérisation de béton autoplaçant (à l'état frais et durci), l'action des superplastifiants et ainsi que l'influence de types et pourcentage des ajouts sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP.

Perspectives

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

Il serait intéressant de conduire les mêmes études sur d'autres types de matériaux (d'autres ajouts, ciment, d'adjuvants...).

Etudier l'effet du type de superplastifiant sur le comportement des BAP.

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 mécaniques tel que la résistance à la fatigue, le retrait, résistance au gel/dégel.

REFERENCE

REFERENCE

- [1] **Hanaa fares**, "propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposes a une temperature élevée", these de Doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise Décembre 2009.
- [2] **Benakli Sarah**, "Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajouts des dechets de construction", Memoire de Magiser de l'Université mouloud mammeri de tizi-ouzou.
- [3] **Cristian Bernardini** " les bétons autoplaçant". le delegue general de l'IREX
- [4] **H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi**. «*Self-compacting concrete*». Structural Concrete, 17, March 2000.
- [5] **Okamura et Ouchi**, «*Self-compacting concrete*», Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp 5-15].
- [6] **Domone P** (2006) Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies Cement and Concrete Composites, 28(2), 197 - 208.
- [7] **AFGC**, «Bétons Autoplaçants - Recommandations Provisoires». Documents Scientifiques et Technique, Page 63, 2000.
- [8] **Fiche technique CMI Béton, tome 2** les bétons: formulation, fabrication et mise on oeuvre page 160
- [9] **Les nouvelles offres du matériau béton** chapitre 04 p35.]
- [10] **ACI Committee 237**, Publication Year:2007
- [11] **Boukni Bariza**, tenue au Feu des Bétons Autoplaçants, Mémoire de Magister Université Mentouri Constantine, Décembre 2007.
- [12] **Sedran.T**, Rhéologies et Rhéomètre des Bétons. application au Béton Autonivlant, Thèse de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées ; 1999.
- [13] **P. Turcry** « *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation*», thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes - Université de Nantes, 2004.
- [14] **Khélifa R.**, «Influence des Ciments à base D'Ajouts Minéraux sur les propriétés Mécaniques des Mortiers et des Bétons, Thèse de Magistère en Génie Civil, Université Mentouri de Constantine, le 11 Juillet 2001.
- [15] **Rapport d'essais préliminaires**, «Etude de Ciments aux Ajouts», Entreprise Régionale des Cimenterie de l'Est ERCE, Cimenterie de Ain-Touta, 2005
- [16] **CD de ACC: "Algérien Ciment Company ", 2008**
- [17] **Dreux G. Et Festa J**, « Nouveau guide du Béton et de ses constituants », 8ème édition, Eyrolles, 1998.
- [18] **Febelcem**, Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, « Les Bétons Autoplaçants, Bruxelles, Août 2005.
- [19] **Larrard F**, "Structures Granulaires et formulations des Bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, Avril 2000.
- [20] **Neville .A.M** "propriétés des bétons" Edition Eyrolles 2000.

Reference

- [21] Lange F, Mörte H., Rudert V, "Dense Packing of Cément pastes and resulting consequences on mortar properties", Cement and Concrete Research, 27, 10, pp. 1481-1488, 1997.
- [22] François perche, adsorption de Polycarboxylates et de lignosulfonates sur Poudre modèle et Ciments, Thèse de Doctorat Ecole polytechnique, Fédérale de Lausanne, Suisse. 2000.
- [23] Aïtcin, P.C., Jolicoeur, C., Mac Gregor, J.G. (1994) « *Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't* », Concrete International, mai, Vol. 16, No. 5, p. 45-52.
- [24] Flatt R.J., Houst Y.F., « A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers », Cement and Concrete Research, vol. 31, 8, pp. 1169-1176, 2001.
- [25] Jolicoeur C., Simard M.A., « *Chemical Admixture-Cement Interactions: Phenomenology and Physico-chemical Concepts* », Cement and Concrete Composites, 20, pp. 87-101, 1998.
- [26] Nkinamubanzi, P.C. (1993) « *Influence des dispersants polymériques (superplastifiants) sur les suspensions concentrées et les pâtes de ciment* », thèse de doctorat, Département de chimie, Université de Sherbrooke.
- [27] Bonneau O., « *Etude des effets physico-chimiques des superplastifiants en vue d'optimiser le comportement rhéologique des bétons à -Hautes Performances* », thèse de doctorat en cotutelle, Ecole Normale Supérieure de Cachan et Université de Sherbrooke, 1997
- [28] Uchikawa, H., Hanehara, S., Sawaki, D. (1997) « *The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture* », Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 1, pp. 37 – 50,
- [29] Hanehara, S., Yamada K., « *Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, adsorption behaviour of admixture, and paste rheology* », Cement and Concrete Research, Vol. 29, 8, pp. 1159-1165, 1999
- [30] Yamada K., Takahashi T., Hanehara S., Matsuhisa M., « *Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer* », Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2, pp. 197-207, 2000
- [31] RILEM, « *Self Compacting Concrete* », State-of-the-Art report of Rilem Technical Commite 174-SCC Self Compacting Concrete Edited by A°, Skarendhal and Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L
- [32] JM^{me} ZEMIRLINE Soulef étude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton fluide (autoplaçant) centre universitaire de yahia farès de médéa
- [33] T. Noguchi, S.G Oh, F. Tomosawa, « *Rheological approach to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete* », Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, suede, pp. 59-70, 1999
- [34] Thierry Sedran, « *Les Béton Autonivelants (BAN) Synthèse Bibliographique* », Liaison Labo P et Ch 196, PP 53-60, Mars-Avril1995

Reference

- [35] **Pera J., Husson S. and Guilhot B.**, « *Influence of finely ground limestone on cement hydration* », Cement and Concrete Composites, pp. 99-105, 1999.
- [36] **Shi C., Wu Y., Shao Y. and Riefler M.**, « Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete », ACBM center, pp. 349-354, 2002
- [37] **S. Assié., G. Escadellas, G. Marchese**, « Durability of self-compacting concrete » 3rd International Symposium on Self Copacting concrete, pp 665-662, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003
- [38] **H. Gram, P. Piparinen** , « *Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance*», Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 211-225, 13-15 Septembre 1999
- [39] **E. Proust**, « *Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés* », thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002
- [40] **Baron J. et Ollivier J.P.**, « Les Bétons – Bases et données pour leur formulation », éditions Eyrolles, 1996
- [41] **Okamura H., Ozawa K.** "Self-compactable high performance Concrete" International Workshop on High Performance Concrete, American Concrete Institute, Detroit, pp. 31-44, (1994)
- [42] **AbdelHamid R'MILI** these de Doctorat "Étude de formulation et de comportement des Bétons Auto-Plaçants: Incorporation du sable de concassage et du sable du desert" L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis
- [43] **Paco. Diederich**, Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des Fillers Calcaires sur le comportement Autoplaçant du béton, Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, Décembre 2010
- [44] **CIM béton, Le Béton** « Les Techniques de mise en place du Béton évoluent » CSTB Magazine, N°109, Novembre 1997
- [45] **Bertin.JF**, « recommandations de mise en oeuvre des Bétons Autoplaçants et des Autonivelants », Fédération Française du Bâtiment, Sebtp (Paris) ,2003.
- [46] **George dreux, jeanfesta**, nouveau guide du béton et ses constituants, Edition eyrolles 1998, pp 8_20.
- [47] **V.Furian et Y. Houst**, les matériaux pouzzolaniques et leurs utilisation, laboratoire des matériaux pirreux de l'EPF, lausanne, chronique du LMP1980
- [48] **DJOBBO YANKWA Jean Noël** , effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments gépolyinères a base scories volcanique.
- [49] **BELHOCINE AIDA; NAGOUDI NADJAT** "Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts Minéraux" Université KASDI Merbah – Ouargla 2014.
- [50] **Zhang X., Han J.**, "The effect of ultra-fine admixture on the Rheological property of ciment paste", Cément and Concrete Research, 30, 5, pp. 827-830, 2000.
- [51] **Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y.**, "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone Filler-effect of powder content and W/C ratio", Cément and Concrete Research, 35, 3, pp. 532-539, 2005].
- [52] **VENUAT M**; la pratique des ciments et des betons, edition du moniteur, paris, p.75-224 1976.

Reference

[53] **BOUTIBA.A** "contribution a l'etude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires" these de doctorat sino dato a l'Université de Mentouri Constantine.

[54] **Guide laitiers de hauts fourneaux** cete de l'Est
LRPC Nancy page 2.

[55] **Bucchi, R.** (1986) «Aperçus sur les ajouts et les ciments composés du point de vue de l'industrie», 8^{eme} congrès de chimie des ciments, Rio de Janeiro, pp. 185-198.

[56]**K. Manai.** « Étude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants » Mémoire de Maîtrise, Université de Sherbrooke. (1995).

[57] **Rouis. F.**, «Formulation et Propriétés Mécaniques des Bétons Autoplaçants à Base de Laitier de Haut Fourneau», Thèse de Magister, Centre universitaire YAHIA FARÈS de Médéa.

[58]**M. Saric-Coric, P. Aïtcin,** «Béton à haute performance à base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice », Canadien Journal of Civil Engineering 30, pp. 414-428 (2003).

[59] **Shao. Y., Lefort. T., Moras. S., Rodriguez. D.**, Studies on concrete containing ground waste glass, Cement and Concrete research 30 (2000), pp. 91-100

[60] **MERNIZ MOHAMED** Etude de l'influence de la nature et les Dimensions des fibres sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants (BAP)
Memoire de Master Université Mohamed Boudiaf - M'sila

ANNEXES

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30Conforme à la norme EN 934-2/TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA TPA**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau****DESCRIPTION**

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Éther qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

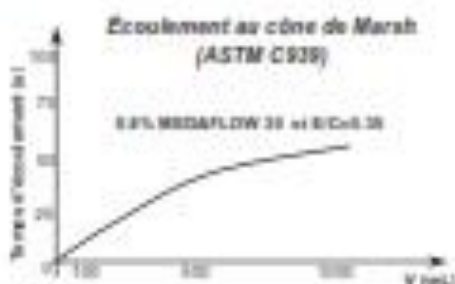
- Bétons à hautes performances
- Bétons auto-plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	38.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 8.5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.45 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convergence pour déterminer le fourche d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



