

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie civil

Spécialité : matériaux en Génie civil

Par

○ **Rebai amel**

Intitulé

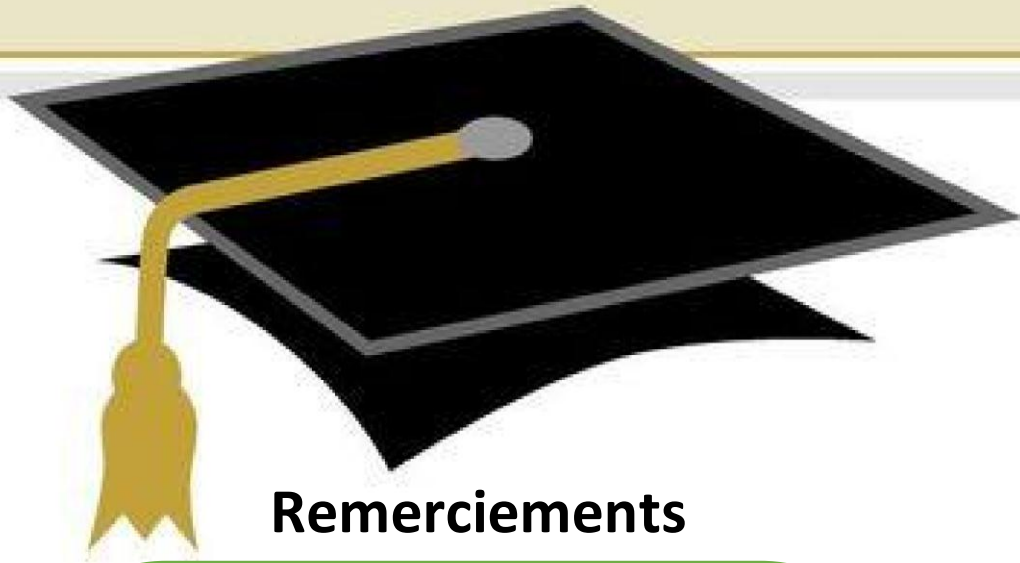
***Analyse de l'influence des fillers calcaires sur la rhéologie d'un
béton auto plaçant***

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.</i>		<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme TABET Souad</i>	<i>MAA</i>	<i>Encadrante</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.</i>	<i>....</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2023/2024



Remerciements

Je remercie Allah de m'avoir donné la capacité de penser,
la santé, la patience pour aller au bout d'un rêve.

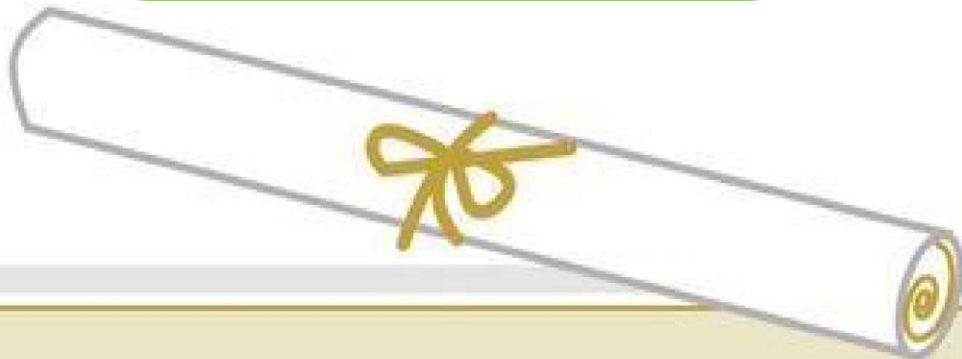
J'adresse mes chaleureux remerciements à mon encadrante,
Mme TABET Souad pour sa guidance et ses précieux conseils
lors de la préparation de mon mémoire et m'a donné toutes les
instructions nécessaires pour mener à bien ce travail

A tous mes enseignants, chacun avec son nom,
je vous remercie du fond du cœur de m'avoir formée

Que soient aussi remerciés tous les ingénieurs de notre
Laboratoire pour leur patience, et leur disponibilité tout au long
de la réalisation de ce travail

A mes collègues AOUKLI Hamza et LAIFOUI Maamar qui m'ont
accompagnée pas à pas et m'ont soutenue tout au long de mon
projet, je leur souhaite toute la réussite

Pour toute personne ayant contribué de près ou de loin pour
que ce mémoire s'achève à sa fin.





Dédicace

A MES CHERS PARENTS

Aux quels je dois ce que je suis.

Je vous dédie ce modeste travail

Que Dieu vous protège.

Ainsi que mes frères et sœurs

A mes filles bien aimées

Vous êtes la lumière qui éclaire mon chemin

A mes amis et collègues



Amel Rebai

SOMMAIRE Liste des tableaux

.....	i
Liste des figures	ii
Résumé- <i>Abstract</i> -ص ملخ	iii
Introduction générale.....	
..... 1	7
I.1. Introduction.....	2
I.2 Définition	2
I.3. Domaines d'application	2
I.4 Avantages et inconvénients du béton autoplaçant	3
I.4.1 Avantages.....	3
I.4.2. Inconvénients	4
I.5. Principes de base et exigences du BAP	4
I.6. La spécificité de la composition des BAP	4
1.6.1 Un volume de pâte élevé.....	4
1.6.2 Une quantité de fines élevée.....	5
1.6.3. un faible volume de gravillons	5
I.7. L'utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité)	5
I.7.1. L'utilisation de superplastifiants	5
I.8. Constituants des BAP.....	6
I.8.1. Le ciment	6
I.8.2. les granulats	7
I.8.2.1. Granulats concassés.....	7
I.8.2.2. Granulats roulés	7
I.8.3. L'eau de gâchage.....	7
I.9. Les ajouts minéraux	7
I.9.1. les fillers calcaires	7
I.9.2. Description des fillers calcaires	8
I.10. Conclusion	8
Chapitre II Identification spécifique aux bétons autoplaçants et intérêts des	
fillers calcaires	8
II .1. Introduction	9
II .2. Identification des BAP À 'état frai.....	9
II.2.1. Essai d'étalement	9
II.2.2. L'essai de la boîte en L	9
II.2.3. Essai de stabilité au tamis	10
II.2.4. Essai de Rhéomètre.....	10
II.2.4.1 les grandeurs de rhéologie.....	11
II.3. Caractérisation des BAP à l'état durci	12
II.3.1. La résistance à la compression.....	12
II .3.2. La résistance à la flexion.....	13
II .3.3 Essai de scléromètre.....	13
Partie 02 : intérêts des fillers calcaires dans les BAP.....	13
II.4. L'effet des fillers de calcaire sur la performance d'un béton autoplaçant	13
II.4.2. Amélioration de la cohésion et de la fluidité.....	14
II.4.3. Réduction de la demande en eau	14
II.4.4 Effets sur la résistance mécanique	14
II.4.5. Influence sur la durabilité	14

II.4.6. Impact environnemental.....	14
II.5. Conclusion.....	14
Chapitre.....	14

Chapitre I
Propriétés des bétons autoplaçants (BAP)
Caractérisation des matériaux utilisés

III.1. Introduction	
15 Sommaire	
<hr/>	
III .2. Présentation des matériaux utilisés	
15	
III.3. Caractéristiques des matériaux utilisés	
15 III.3.1. Le sable	
.....	15
III.3.1.1. Essai d'analyse granulométrique	
15	
III. 3.1.2. Les caractéristiques physiques	
17	
III.3.2. Gravier	
18	
III.3.2.1. Analyse granulométrique	
18	
III.3.3. Ciment (CEM II/B 42,5)	
19	
III.3.3.1. Caractérisation chimique et minéralogique du ciment utilisé (CEM II/B 42.5)	
19	
III.3.3. 2. Caractéristiques physiques du ciment utilisé	
20	
III. 3.4. Les fillers calcaires	20
.....	III.3.5. Les adjuvants
.....	21
III.3.5.1. Définition	
21	
III.3.5.2. Dosage en super plastifiant	
21	
III.3.6. L'eau de gâchage	
22	
III.4. Formulation du béton auto plaçant	
22	
III.4.1. Choix des constituants pour formulation	
22	
III.4.2. Calcul des composantes des mélanges pour 1 m ³ de béton (1000 litres)	
22	
III.5. Procédures de fabrication des BAPs	
25	
III.6. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais	
25	
III.6.1. L'essai d'étalement au cône d'Abrams	
25	
III.6.2. L'essai de la boîte en L	25
.....	
.....	25

III.6.3. Stabilité au tamis.....	26
III.6.4. Essai rhéomètre	26
III.6.5. Confection des éprouvettes	26
III.6.5.1. type et taille des moules	26
III.6.5.2. Conservation des éprouvettes	26
III.7. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci	27
III.7.1. Les essais destructifs.....	27
III.7.1.1. La résistance à la compression.....	27
III.7.1.2. La résistance à la traction par flexion	27
III.7.2. Les essais non destructifs.....	27
III.7.5.1 Ultrason	27
III.7.5.2 Essai au scléromètre	27
III.8. Conclusion	27

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction	28
IV.2. Résultats des essais de caractérisation des BAP	28
IV.2.1. Résultats des essais à l'état frais	28
IV.2.1.1. Résultats des essais spécifiques au béton autoplaçant	28
IV.2.1.2 Comportement rhéologique des BAP	31
IV.2.2. Résultats des essais destructifs	33
IV.2.2.1. La résistance à la compression	33
IV.2.2.2. La résistance à la traction par flexion	35
IV.2.2. Résultats des essais non destructifs	37
IV.6. Conclusion	39
Conclusion générale	40
Références bibliographiques	41

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau III.1. Résultats de l'analyse granulométrique du sable	16
Tableau III.2. Classification du sable en fonction du module de finesse	17
Tableau III.3. Les caractéristiques physiques du sable utilisé	17
Tableau III.4. L'analyse granulométrique du gravier 3/8 et 8/16	18
Tableau III.5. Les caractéristiques physiques du gravier utilisé	19
Tableau III.6. Classification des roches en fonction du coefficient LA	19
Tableau III.7. Les compositions chimique et minéralogique du CEM II/B 42.5	20
Tableau III.8. Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5	20
Tableau III.9. Caractéristiques physicochimiques du calcaire.....	20
Tableau III.10. Caractéristiques de l'adjuvant medaflow 30.....	21
Tableau III.11. Formulation des BAP de rapport G/S=0.9	24
Tableau III.12 . Formulation des BAP de rapport G/S=1	24

Chapitre IV

Tableau IV.1. Résultats des essais à l'état frais	28
Tableau IV.2. Caractéristiques rhéologiques des différents BAP mesurés par rhéomètre ..	31
Tableau IV.3. La résistance à la compression	33
Tableau IV.4. Résultats de la Résistance à la flexion	35
Tableau IV.5. La vitesse de propagation des ultras son pour les BAP à 28 jours	37

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 Application de béton fluide	3
Figure I.2 Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle.	5
Figure I.3 Défloculation de ciment par le superplastifiant	6
Figure I.4 Composition d'un beton ordinaire (bo)	6
Figure I.5. Illustrations de l'effet des fillers calcaires	8

Chapitre II

Figure II.1. Essai d'étalement	9
Figure II.2 Essai la boîte en L	10
Figure II.3 Essai de la stabilité au tamis	10
Figure II.4. Le rhéomètre	11
Figure II.5. La résistance à la complexion	13
Figure II.6. La résistance à la flexion	13

Chapitre III

Figure III.1.Courbe granulométrique du sable de Oued Souf	16
Figure III.2.Courbe granulométrique des graviers utilisés	18
Figure III.3. Fillers calcaires broyés	21
Figure III.4 Détermination du point de saturation au mini cône	22

Chapitre IV

Figure IV.1. Résultats de l'essai d'étalement	29
Figure IV.2. Résultats de l'essai de stabilité au tamis	29
Figure IV.3. Résultats de l'essai d'écoulement	30
Figure IV.4. Les variations de la masse volumique	30
Figure IV.5. Les variations de la viscosité	32
Figure IV.6. Exemples de Diagrammes de vitesse-couple (Speed-Torque).....	32
Figure IV.7. La résistance à la compression à 7 j.....	34
Figure IV.8. La résistance à la compression à 14j.....	34
Figure IV.9. La résistance à la compression à 28j.....	35
Figure IV.10. La résistance à la flexion à 7j	36
Figure IV.11. La résistance à la flexion à 14j	36
Figure IV.12. La résistance à la flexion à 28j	37
Figure IV.13. Vitesse du son des différents types de béton	38
Figure IV.14. Histogrammes des résistances au scléromètre.....	38

Liste des abréviations

AFGC : Association française de génie civil.

LCPC : Laboratoire central des ponts et

chaussées

BAP : Béton auto plaçant.

BO : Béton ordinaire.

M_f : module de finesse du sable.

Sp : super plastifiant.

PC : poudre de céramique

R_c : La résistance mécanique à la
compression.

R_f : la résistance à la traction par flexion

G : Gravier.

S : Sable.

G/S : le rapport gravier/sable.

E : Eau.

C : Ciment.

ملخ ص-Abstract- Résumé

Résumé

Notre recherche est basée sur l'expérimentale d'un béton autoplaçant, où on va analyser l'influence du rapport G/S, qui est pris égal à 1 et 0,9, sur ces performances rhéologiques et mécaniques, et ce en remplaçant partiellement le volume du ciment par différents pourcentages (20, 25 et 30%) de Fillers calcaires (FC), utilisés dans le domaine de construction.

L'ajout de FC est très bénéfique pour certains dosages.

Les mélanges étaient suffisamment fluides pour avoir une viscosité aussi bonne

Mots clés : béton autoplaçant – rhéologie – viscosité – fillers calcaires

Abstract

Our research is based on the experimental study of a self-compacting concrete, where we will analyze the influence of the G/S ratio, which is taken equal to 1 and 0.9, on these rheological and mechanical performances, and this by partially replacing the volume of cement by different percentages (20, 25 and 30%) of limestone Fillers (LF), used in the construction field.

The addition of LF is very beneficial for certain dosages.

The mixtures were fluid enough to have such good viscosity

Keywords: self-compacting concrete – rheology – viscosity – limestone filler.

ملخص

يعتمد بحثنا على الدراسة التجريبية للخرسانة ذاتية التوضع، حيث سنقوم بتحليل تأثير نسبة الحصى الى الرمل، والتي تساوي 1 و 0.9، على هذه الأداء الريولوجي والميكانيكي، وفي نفس الوقت نقوم بالاستبدال الجزئي لحجم الأسمنت بنسب مختلفة (20، 25، 30%) من حشوات الحجر الجيري (FC) المستخدمة في مجال البناء. تعد إضافة FC مفيدة جدا لجرعات معينة. كانت امزاج سائلة بدرجة كافية للحصول على مثل هذه اللزوجة الجيدة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المضغوطة ذاتيا - الريولوجيا - اللزوجة - الحجر الجيري .

Introduction générale

Introduction générale

Le béton autoplaçant (BAP) est une nouvelle génération de béton qui s'ajuste parfaitement à l'état actuel du développement des structures, avec une main-d'œuvre de moins en moins qualifiée. Cette gamme de béton se distingue par sa grande ouvrabilité et sa grande déformabilité, tout en étant stable et créant des structures résistantes et durables.

Le défi à relever lors de la formulation d'un BAP consiste à obtenir un béton fluide qui ne ségrège pas, qui offre une bonne rhéologie et une viscosité adaptée et qui permet la réalisation de parements de qualité.

Le principe de formulation vise à réduire le seuil de cisaillement du béton en lui conservant viscosité suffisante pour éviter tout risque de ségrégation et de ressuage.

Le but ainsi construit est de trouver généralement une combinaison de constituants qui donneront un béton économique, écologique, et environnemental dont les propriétés seront conformes aux spécifications de ces bétons à l'état frais et à l'état durci.

Cette étude s'inscrit dans ce cadre où on a essayé d'obtenir une formule optimale d'un béton autoplaçant fiable et robuste facilement contrôlable et pour ce faire, on a préparé plusieurs mélanges avec deux rapports différents de G/S (1 et 0,9) et en faisant, à chaque fois, varier le constituant le plus important qui est le ciment et le remplacer partiellement avec des fillers calcaires broyés (20%, 25% et 30% du volume de ciment), en préservant le rapport E/C.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Deux chapitres théoriques pour décrire les propriétés de ces bétons fluides ainsi que les travaux récents sur l'utilisation des fillers calcaires dans les BAP ;
- Un troisième chapitre où on a caractérisé les matériaux utilisés, formulé et soumis les différents bétons aux expériences exigées pour ce type de béton à l'état frais et à l'état durci ;
- Un quatrième chapitre pour discuter et commenter les résultats trouvés du chapitre précédent ;

- Une conclusion générale et recommandations.

1

CHAPITRE I

Propriétés des bétons autoplaçants (BAP)

CHAPITRE I

Propriétés des bétons autoplaçants (BAP)

I.1. Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP), développés depuis les années quatre-vingt, sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « bétons nouveaux » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement. La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraiées ou dans des coffrages complexes et difficilement accessibles.

Ceci nous a amené à faire une étude sur les caractéristiques des BAP, les critères de choix des paramètres constitutifs et les moyens nécessaires pour satisfaire les propriétés désirées de ces types de bétons. Ceci permettra ultérieurement à l'étude de formulation et de comportement des bétons autoplaçants

I.2 Définition

Le béton autoplaçant (BAP), de l'anglais Self Compaction Concrete SCC, est un béton qui à l'état frais se compacte de lui-même par effet gravitaire grâce à son poids propre, sans aucun apport d'énergie de compactage

Les propriétés caractéristiques de ce béton sont les.

- Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance de ségrégation (comme du miel),
- Désaération du béton pendant son écoulement,
- Excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de réservations, d'incorporés et de ferrailage dense. Le fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé [1].

I.3. Domaines d'application

Le béton autoplaçant constitue dans de nombreux domaines une alternative intéressante au béton Conventionnel. Comparé au béton vibré, les arguments* en faveur du béton autoplaçant sont les suivants :

- Rendement amélioré et exécution plus rapide,

- Réduction des nuisances sonores durant l'exécution,
- Liberté accrue des formes de coffrage,

- Facilité de bétonnage d'éléments exigus,

- Qualité accrue des surfaces de béton,

- Facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante,

- Remplissage de parties difficilement accessibles,

- Diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome du vibreur. Outre l'amélioration de la productivité des entreprises, le BAP permet d'accroître la qualité et la durabilité des ouvrages en béton [1].



Figure I.1 Application de béton fluide [1]

I.4 Avantages et inconvénients du béton autoplaçant

I.4.1 Avantages

- Une mise en place facile,
- Une meilleure qualité de finition,
- Une productivité accrue,
- Une réduction des nuisances sonores
- Une amélioration de la durabilité
- Une liberté de conception

I.4.2. Inconvénients

- Coût élevé
- Sensibilité à la composition et à l'environnement
- Limitations de distance de transport Contrôle de la ségrégation

Il est important de noter que ces inconvénients peuvent être atténués par une bonne planification, une expertise adéquate et une mise en œuvre appropriée. Malgré ces inconvénients, les BAP continuent d'être largement utilisés en raison de leurs nombreux avantages dans de nombreux domaines de la construction [2].

I.5. Principes de base et exigences du BAP

En ce qui concerne sa composition, le BAP est composé à peu près des mêmes matériaux constitutifs que le béton ordinaire BO : ciment, granulats, eau plus les adjuvants chimiques et les additions minérales (cendres volantes, fumée de silice, laitier de haut fourneau, filler calcaire, pouzzolane, poussière de fours, etc.). Habituellement, les adjuvants chimiques utilisés sont de type super plastifiant à haute réduction d'eau et éventuellement les agents modifiants de la viscosité. Les additions minérales sont utilisées, outre le ciment, comme matériau extrafin et dans certains cas, elles remplacent le ciment. Cependant, il faut prendre un volume important en super plastifiant pour améliorer l'ouvrabilité et la viscosité apparente du BAP et pour tenir compte le volume important des éléments fins qui jouent le rôle de disperser les gros granulats afin de faciliter l'écoulement [3].

I.6. La spécificité de la composition des BAP

Il existe plusieurs approches de formulation des BAP qui diffèrent légèrement entre elles tout en gardant ses caractéristiques (stabilité, fluidité,). Pour cela, il est nécessaire d'ajouter un agent de viscosité, d'augmenter la quantité des ajouts minéraux et de choisir des teneurs appropriées de sable et de granulat [4].

La composition de ce type de béton doit avoir certain critère soit :

1.6.1 Un volume de pâte élevé

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400l/m³) [5].

I.6.2 Une quantité de fines élevée

Afin de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 Kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels.

I.6.3. Un faible volume de gravillons

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée (figure I.04). Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

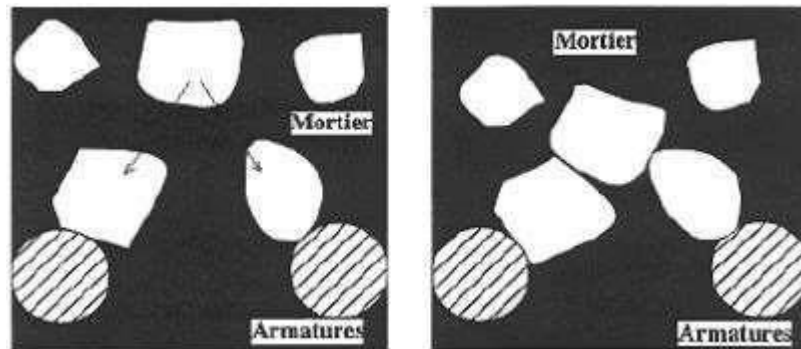


Figure I.2 : phénomenne de blocage des granulats au droit d'un obstacle [6].

I.7. L'utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité)

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés celluloseux, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants

I.7.1. L'utilisation de superplastifiants

Les superplastifiants, également appelés agents réducteurs d'eau à haute efficacité, permettent de réduire la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un béton plastique tout en maintenant sa maniabilité.

L'utilisation de superplastifiants permet d'obtenir un béton très fluide qui peut être mis en place sans avoir recours à la vibration, tout en réduisant les risques de ségrégation et d'exsudation. [7]

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type poly carboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage [8].

Figure I.3 Défloculation de ciment par le superplastifiant [8]

I.8. Constituants des BAP

Les bétons autoplaçants (BAP) sont composés des mêmes constituants de base que les bétons traditionnels, mais avec des proportions et des ajouts spécifiques pour atteindre leurs propriétés particulières. Voici les principaux constituants des BAP.

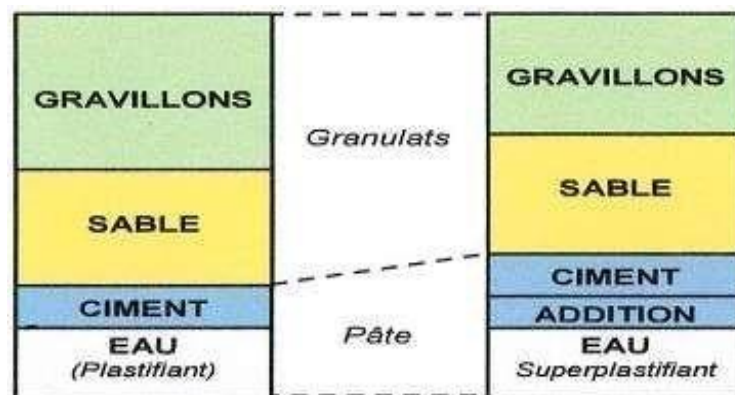


Figure I.4. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP [9].

I.8.1. Le ciment

Le ciment est le principal liant utilisé dans les BAP. Il réagit chimiquement avec l'eau pour former une pâte qui lie les granulats et confère la résistance mécanique au béton [10].

On distingue **5 types de ciments**, selon les constituants utilisés et leurs proportions

- CEM I: Ciment Portland (CPA).
- CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).
- CEM III : Ciment de haut-fourneau (CHF).

- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).
- CEM V : Ciment composé (CLC).

I.8.2. les granulats

Dans les bétons autoplaçants (BAP), les granulats utilisés peuvent être de différentes formes. Mais généralement, on privilégie les granulats anguleux plutôt que les granulats ronds.

Voici deux formes couramment utilisées :

I.8.2.1. Granulats concassés

Les granulats concassés ont des arêtes vives et une forme angulaire. Ils sont obtenus par concassage de roches naturelles ou de débris de construction. Les granulats concassés offrent une bonne adhérence entre les particules, ce qui améliore la cohésion du BAP.

I.8.2.2. Granulats roulés

Les granulats roulés ont une forme plus arrondie et lisse. Ils sont généralement obtenus à partir de graviers naturels.

Les granulats roulés peuvent être utilisés dans les BAP, mais ils peuvent être moins préférables car leur forme ronde peut réduire la friction entre les particules et affecter la stabilité et l'homogénéité du mélange.

I.8.3. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage doit être soigneusement dosée pour obtenir un mélange homogène et une hydratation optimale du ciment. Les différents aspects de l'eau de gâchage, tels que sa quantité, sa qualité, son rapport eau/ciment et ses effets sur les propriétés du béton.

I.9. Les ajouts minéraux

Les BAP peuvent contenir des ajouts minéraux tels que des cendres volantes, du laitier de Haut fourneau, les pouzzolanes naturelles, la fumée de silice, des matériaux recyclés ou des fillers, qui sont des matériaux fins ajoutés au ciment pour améliorer certaines propriétés du béton, comme la durabilité et la résistance aux agressions chimiques [11].

I.9.1. Les fillers calcaires

Comme la poudre de céramique, déchets de marbre et de brique, les granulats recyclés, poudre de verre... et parmi les ajouts les plus utilisés et plus efficaces au béton autoplaçant, on cite les fillers de calcaire pas seulement pour l'optimisation mais aussi pour des avantages techniques, économiques et environnementale.

I.9.2. Description des fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (Calcaires, bentonite, etc.) Présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 Supérieure à 75%. Ils sont élaborés à partir de matériaux calcaires, de dolomites ou de calcaires finement écrasés. Ce sont de bons correcteurs de courbe granulométrique utilisés aussi pour augmenter la quantité des fines [11].

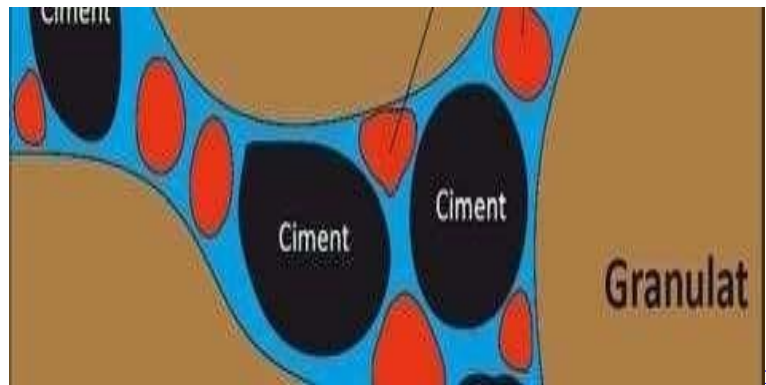


Figure I.5 Illustrations de l'effet fillers calcaires [11]

I.10. Conclusion

Le béton autoplaçant est un matériau innovant reconnu pour ses propriétés exceptionnelles telles que sa fluidité, sa résistance à la ségrégation et sa capacité de remplissage élevée.

Pas besoin de recourir à de fortes vibrations, ils présentent donc des avantages en termes de productivité, la qualité de la finition et la facilité de mise en œuvre, cependant leurs formulations est la caractérisation encaissante approfondie ;

Le béton autoplaçant reste l'objet d'une optimisation en recherche et développement.

**CHAPITRE II Identification
spécifique aux bétons
autoplaçants et intérêts des
fillers calcaires**

Chapitre II

Identification spécifique aux bétons autoplaçants et intérêts des fillers calcaires

Partie 01 : Identification des bétons autoplaçants

II .1. Introduction

Avant d'accepter une composition comme le BAP, il est essentiel de vérifier que le béton obtenu présente réellement les caractéristiques recherchées. C'est pourquoi de nombreux essais sont disponibles pour évaluer les diverses caractéristiques du béton à l'état frais.

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP et leurs propriétés à l'état frais.

Ces essais sont recommandés par l'association française de génie civil (AFGC).

II .2. Identification des BAP À 'état frai

II.2.1. Essai d'étalement

L'essai d'étalement, également appelé essai de lump-flow, est utilisé pour mesurer la fluidité et l'aptitude à l'auto-étalement d'un béton autoplaçant (BAP) à l'état frais. L'essai consiste à verser un cône tronqué rempli de BAP sur une plaque plane, puis à retirer le cône. La distance horizontale parcourue par l'étalement du BAP, appelée écart d'étalement ou écart de lump, est mesurée pour évaluer sa consistance généralement entre 600 et 750 mm



Figure II.1. Essai d'étalement (laboratoire de génie civil)

II.2.2. L'essai de la boîte en L

La mobilité du BAP en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée, sont mesurées 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 [2].

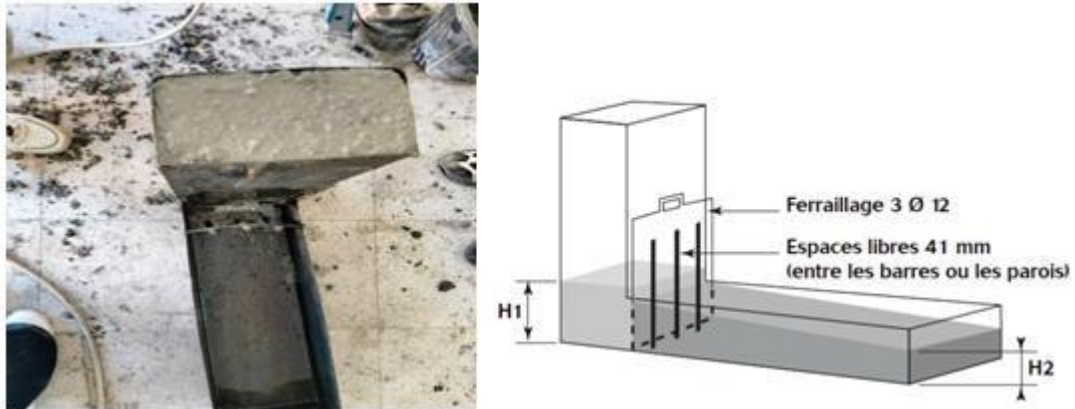


Figure II.2. Essai de la boîte en L (laboratoire de génie civil)

II.2.3. Essai de stabilité au tamis

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 autonivelant 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.

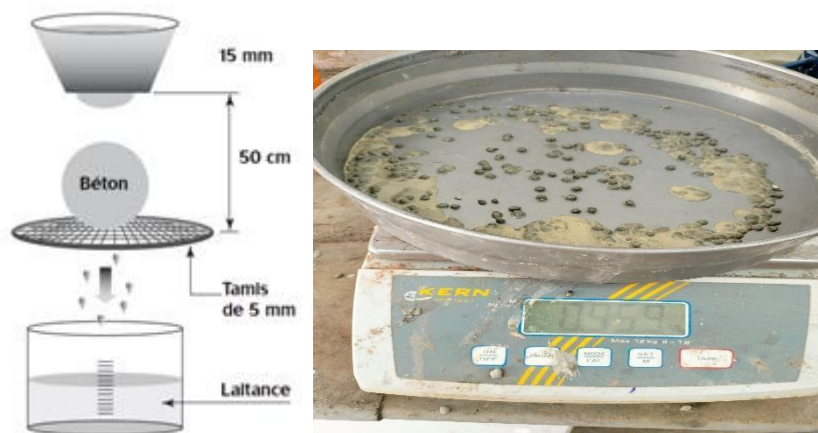


Figure II.3. Essai de la stabilité au tamis (laboratoire de génie civil)

II.2.4. Essai de Rhéomètre

L'essai de rhéomètre, également appelé essai de viscosité ou essai de comportement rhéologique, est utilisé pour mesurer les propriétés de fluage et de déformation d'un béton autoplaçant (BAP) à l'état frais, elle utilise un appareil appelé rhéomètre, qui est équipé d'une géométrie de mesure spécifique, généralement un cône et une plaque. Le BAP est placé entre le cône et la plaque, et des mesures sont effectuées pour évaluer son comportement lorsqu'il est soumis à des contraintes de cisaillement, cet essai permet de caractériser les propriétés rhéologiques du BAP, telles que sa viscosité dynamique, son seuil de cisaillement, sa résistance au fluage et sa capacité d'écoulement. Ces informations sont essentielles pour

comprendre le comportement du BAP pendant le processus de coulage, le remplissage des coffrages [3].

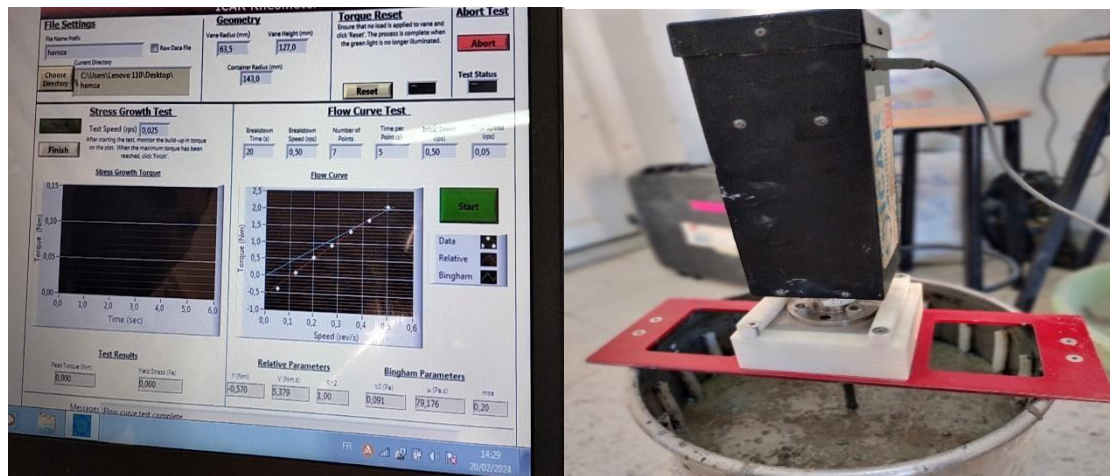


Figure II.4. Le rhéomètre (laboratoire de génie civil)

II.2.4.1 les grandeurs de rhéologie

Généralement les bétons présentent un comportement viscoplastique Benthamien.

La loi de comportement des BAP, s'écrit comme suit :

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

Où :

- τ (Pa) : la contrainte de cisaillement.
- τ_0 (Pa) : le seuil de cisaillement.
- μ (Pa.S) : La viscosité plastique.
- $\dot{\gamma}$ (1/s) : le taux (vitesse) de cisaillement.

a) Contrainte de cisaillement τ (Pa)

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'arrivée de contraintes τ , qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche [4].

b) Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ (s^{-1})

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles emprisonnées entre 2 plans parallèles de surface séparés d'une distance h . Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance dx à une vitesse constante de norme V_0 . Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse.

c) Viscosité dynamique μ (P.A.S)

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

Tangentielle, le coefficient de viscosité est défini par la relation suivante : $\mu = \tau / \dot{\gamma}$

Le coefficient de viscosité est une grandeur physique qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Sa connaissance satisfait parfois à caractériser le comportement rhéologique du matériau.

d) Seuil de cisaillement τ_0

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour qu'un fluide, soumis à une déformation de cisaillement, s'écoule. En dessous de cette valeur, ce dernier se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes) [5].

II.3. Caractérisation des BAP à l'état durci

Lorsque le BAP est formulé et mis en œuvre de manière adéquate, ses propriétés à l'état durci (résistance, déformation, durabilité) ne se différencient guère de celles d'un béton ordinaire vibré. Généralement ces propriétés d'après plusieurs chercheurs, sont meilleures, en particulier lorsque le béton spécifié doit répondre à des exigences courantes, ce qui est généralement le cas dans le domaine du bâtiment.

II.3.1. La résistance à la compression

Cet essai consiste à appliquer une charge axiale sur e des éprouvettes de béton cubique à diamètre $(10) \times (10) \text{ cm}^3$ pour mesurer sa résistance à la compression. Il permet de déterminer la capacité du béton à résister à des forces de compression et est largement utilisé pour évaluer la qualité et la résistance du béton. On enregistre la charge maximale atteinte, notée P (KN), ainsi que la surface de chargement S (m^2). On peut ainsi calculer la contrainte maximale en divisant la charge maximale par la surface de



Figure II.5. L'essai de résistance à la compression (laboratoire de génie civil)

II .3.2. La résistance à la flexion

L'essai de résistance à la traction par flexion est réalisé en suivant une méthode qui implique la soumission d'éprouvettes prismatiques, placées sur deux appuis, à une charge concentrée croissante appliquée au milieu jusqu'à la rupture.



Figure II.6. L'essai de résistance à la flexion (laboratoire de génie civil)

II. 3.3 Essai de scléromètre

L'essai de scléromètre, est une méthode rapide non destructive utilisée pour évaluer la résistance du béton à partir de la dureté de sa surface. Cet essai mesure l'indice de rebondissement d'un impacteur en acier projeté sur la surface du béton [6].

Partie 02 : intérêts des fillers calcaires dans les BAP

II.4. L'effet des fillers de calcaire sur la performance d'un béton autoplaçant

Des recherches sur les effets des fillers calcaires ont été menées depuis la fin du 20 siècle jusqu'à ces jours.

L'ajout de fillers de calcaire dans un béton autoplaçant peut avoir divers effets sur sa performance et inclure divers aspects tels que :

II.4.2. Amélioration de la cohésion et de la fluidité

Les fillers calcaires peuvent agir comme des agents de remplissage, remplissant les vides entre les particules de ciment et d'agrégats, ce qui peut améliorer la cohésion du mélange et favoriser une meilleure fluidité du béton [12].

II.4.3. Réduction de la demande en eau

L'incorporation de fillers de calcaire peut permettre de réduire la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un mélange de béton autoplaçant avec la même consistance, ce qui peut conduire à une meilleure compacité et une plus grande résistance à long terme [13].

II.4.4 Effets sur la résistance mécanique

L'impact sur la résistance mécanique dépend de divers facteurs tels que la quantité de fillers de calcaire ajoutée, leur granulométrie et leurs propriétés chimiques. Dans certains cas, l'ajout de fillers de calcaire peut conduire à une légère réduction de la résistance initiale, mais des études montrent également que cela peut être compensé par une augmentation de la résistance à long terme [14].

II.4.5. Influence sur la durabilité

Les fillers de calcaire peuvent contribuer à améliorer la durabilité du béton autoplaçant en réduisant la perméabilité et en diminuant la sensibilité à certains processus de détérioration, tels que la réaction alcali-silice et la carbonatation [15].

II.4.6. Impact environnemental

L'utilisation de fillers de calcaire peut également avoir des avantages environnementaux en réduisant la quantité de ciment nécessaire dans le mélange, ce qui peut contribuer à réduire les émissions de CO₂ associées à la production de ciment [16].

En résumé, l'ajout de fillers de calcaire peut apporter divers avantages au béton autoplaçant en termes de cohésion, fluidité, réduction de la demande en eau et amélioration de la durabilité, bien que l'effet sur la résistance mécanique puisse varier en fonction des conditions spécifiques de chaque application.

II.5. Conclusion

Conçu pour évaluer les exigences technico-économiques et les impacts environnementaux dans la fabrication du béton, le béton autoplaçant peut être produit en ajoutant les fillers calcaires, tout en préservant de très bonnes propriétés à l'état frais et durci.

CHAPITRE III

Caractérisation des matériaux utilisés et formulation

Chapitre III

Caractérisation des matériaux utilisés et formulation

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons identifier quantitativement les différentes caractéristiques des matériaux locaux utilisés dans l'industrie du béton autoplaçant.

Tous les essais ont été réalisés au laboratoire de génie civil de notre université.

III.2. Présentation des matériaux utilisés

- Un sable de dune provenant d'Oued Souf ;
- Deux fractions de gravier concassé (3/8,8/16) l'origine carrière Mechri BBA ;
- Ciment portland CPJ42.5 provenant de la cimenterie Lafarge M'sila ;
- Un superplastifiant de MEDAFLOW SP 30 de Granitex ;
- Les fillers calcaires ;
- L'eau de gâchage : eau de laboratoire de génie civil, université de BBA.

III.3. Caractéristiques des matériaux utilisés

III.3.1. Le sable

III.3.1.1. Essai d'analyse granulométrique : [NF EN P18-650]

L'analyse granulométrique, selon la norme [NF EN P18-650], permet de déterminer la grosseur minimale «d» et la grosseur maximale «D» des matériaux entrant dans la composition du béton, pour pouvoir les combiner dans les meilleures conditions.

L'allure de la courbe granulométrique, permet de faire apparaître certaines propriétés des matériaux utilisés pour l'analyse.

L'analyse permet aussi de calculer le module de finesse du matériau et en particulier celui du sable, qui est un facteur important dans une étude de composition de béton. Les résultats sont exploités sous forme de tableau et courbe granulométrique:

Tableau III.1. Résultats de l'analyse granulométrique du sable

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
3.15	4.26	4.26	0.43	99.57
2,5	5.01	9.27	0.93	99.07
1,25	37.52	46.79	4.68	95.32
0,63	126.15	172.94	17.29	82.71
0,315	458.26	631.2	63.12	36.88
0.16	299.64	930.84	93.08	6.92
0,08	55.14	986.84	98.60	1.40
Fond	14	1000	100	0.00

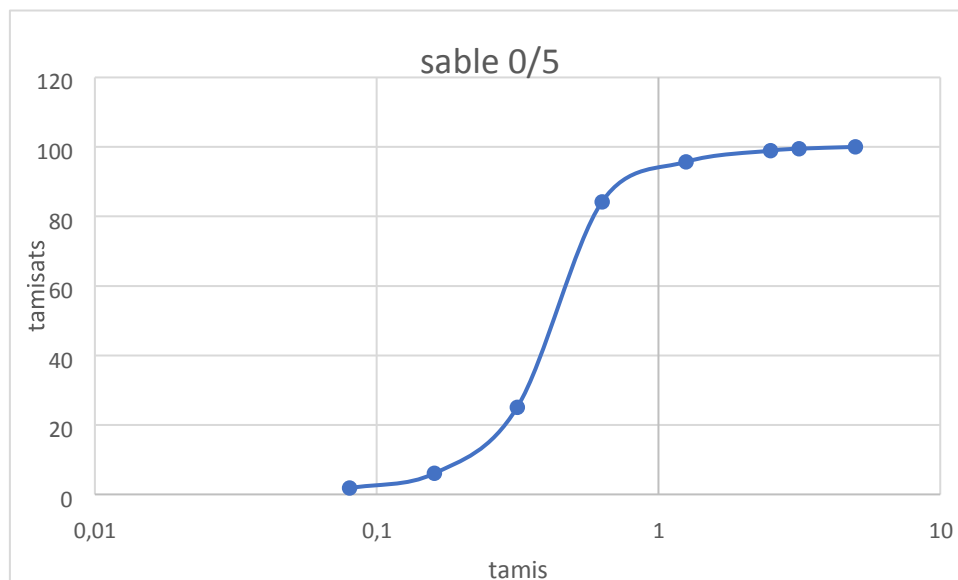


Figure III.1. Courbe granulométrique du sable Oued Souf

○ **Module de finesse : [NF EN P 18-304]**

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 et 3.15mm] sur 100 et calculé par la relation suivante:

$$Mf = \sum Rc / 100$$

Où: Rc est le refus cumulé

Les normes soviétiques spécifient le module de finesse Mf des sables comme suit:

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

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

On se basant sur cette classification, le module de finesse M_F vaut :

$$M_F = \frac{0.43 + 4.68 + 17.29 + 63.12 + 93.08}{100} = 1.79$$

- Le sable utilisé est considéré comme **un sable fin à moyen**.

III. 3.1.2. Les caractéristiques physiques

‡ Masse volumique spécifique (absolue) [NF EN P 18-555], apparente [NF EN P 18-555], porosité, compacité et indice des vides

Pour étudier la formulation d'un béton, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques physiques selon les normes recommandées par l'AFGC, Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau III.3.

A noter que les valeurs mentionnées sont la moyenne de trois essais.

Tableau III.3. Les caractéristiques physiques du sable utilisé

Caractéristiques physiques	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Porosité $P = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}$ (%)	Compacité $C = 1 - P$ (%)	Indice de vides E $E = \frac{P}{C}$
Valeurs moyennes	2.6	1.5	42.31	57.69	0.73

III.3.2. Gravier

Les fractions des graviers utilisées sont la fraction **3/8** et la fraction **8/16**. Après le nettoyage avec l'eau et séchés l'étuve à 105° C.

III.3.2.1. Analyse granulométrique

Les mêmes étapes d'essai que celui du sable sauf pour les diamètres des tamis. La masse prise Pour la fraction 3/8 est de 1.6 kg et celle de la fraction 8/16 est de 3.2 Kg.

Tableau III.4. Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 3/8 et 8/16

Tamis (mm)	Refus partiel (g)		Refus cumulés (g)				Tamisât (%)	
	3/8	8/16	(g)		(%)		3/8	8/16
			3/8	8/16	3/8	8/16		
16	-	0	-	0	-	0	-	100
14	-	260.64	-	260.64	-	8.69	-	91.31
12.5	-	517.64	-	778.28	-	25.94	-	74.06
10	-	1084.65	-	1862.93	-	62.10	-	37.90
8	2	858.35	2	2721.28	0.125	90.71	99.88	9.29
6.3	159	279.48	161	3000	10.06	100	89.94	-
5	664	-	825	-	51.56	-	48.44	-
4	497	-	1322	-	82.63	-	17.37	-
3,15	247	-	1569	-	98.06	-	1.94	-
Fond	12	-	1581	3197	100	99.90	00.00	0.10

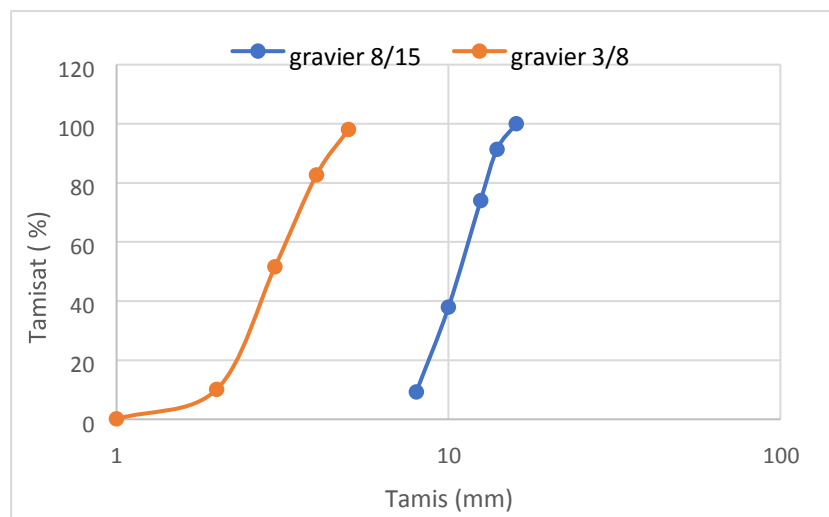


Figure. III.2. Courbes granulométriques du gravier 8/16 et 3/8

✦ *Masses volumiques absolue et apparente [NF EN P18-554], Compacité, porosité et l'indice de vide [NF EN P 18-554] :*

Les résultats sont regroupés dans le tableau III.5.

Il est à noter que les valeurs mentionnées sont la moyenne de trois essais répétés.

Tableau III.5. Les caractéristiques physiques du gravier utilisé

Valeurs moyenne Caractéristiques Physiques	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Porosité ρ_{app} $P = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}$ (%)	Compacité $C = 1 - P$ (%)	Indice de vides $E = \frac{E}{C}$
Gravier 3/8	2.6	1.34	48.46	51.54	0.94
Gravier 8/16	2.67	1.44	46.06	53.94	0.85

III.3.2.2. Les caractéristiques mécaniques du gravier

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

† Essai Los Angeles [NF EN P18-573]

$$LA = 100x = \frac{5000-4069}{5000} = 19 \%$$

Tableau III.6. Classification des roches en fonction du coefficient LA

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

Le gravier (8/16) est un gravier **très dur** se trouve dans l'intervalle des graviers admissibles.

III.3.3 Ciment (CEM II/B 42,5)

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

III.3.3.1. Caractérisation chimique et minéralogique du ciment utilisé (CEM II/B 42.5)

Le tableau III.7 récapitule les différents composants chimiques du ciment.

Tableau III.7. Les compositions chimique et minéralogique du CEM II/B 42.5

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O
Teneur	20.7	4.75	62.92	3.75	1.90	1.98	0.09
Elément	C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF

Teneur (%)	59	14	6	100
-------------------	----	----	---	-----

III.3.3. 2. Caractéristiques physiques du ciment utilisé (EN 196-1)

D'après les résultats de l'essai de la masse volumique ainsi que sa fiche technique, les caractéristiques physiques du ciment sont résumées au tableau III.8.

Tableau III.8. Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5

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

III. 3.4. Les fillers calcaires

Le tableau ci après montre les différentes propriétés physicochimiques du calcaire utilisé :

Tableau III.9. Caractéristiques physicochimiques du calcaire

Physique		chimiques		
CaO	57,60	Densité absolue	2.73	g/cm^3
Al ₂ O ₃	0,07	Densité apparente	0.77	g/cm^3
Fe ₂ O ₃	0,00	S.S.B	2000	cm^2/g
SiO ₂	0,13	D ₁₀	1.1	μm
Mgo	0,13	D ₅₀	4.06	μm
Na ₂ O	0,06	D ₉₀	28.67	/
K ₂ O	0.00	I ₂₈	0.74	/
Cl ₁	0,02	I ₉₀	0.76	
SO ₃	41,98			
P-A-F (1000°C)				



Figure III.3. Fillers calcaires broyés utilisés. III.3.5.

Les adjuvants

Dans notre étude on a utilisé un super-plastifiant de type **MEDAFLOW 30** de Granitex.

III.3.5.1. Définition

Le « **MEDAFLOW 30** » est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Permet d'obtenir des bétons de très haute qualité et ne présente pas d'effet retardateur.

Les caractéristiques du MEDAFLOW 30 sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau. III.10. Caractéristiques de l'adjuvant « MEDAFLOW 30 »

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

III.3.5.2. Dosage en super plastifiant

Le dosage choisi est celui de saturation, déterminé à partir de l'essai au mini cône qui consiste à remplir le petit cône, à chaque fois, de pâte de liant préparée avec plusieurs pourcentage de superplastifiant par rapport à la masse du ciment , 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, après une minute, 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.3**.

Pour cette étude la valeur vaut 2 % de la masse du liant (ciment).



Figure. III.4. Détermination du point de saturation au mini cône (laboratoire de génie civil)

III.3.6. L'eau de gâchage

L'eau utilisée dans ce gâchage c'est une eau potable dans notre laboratoire génie civil de l'université de Bordj Bou Arreridj.

III.4. Formulation du béton auto plaçant

Il est nécessaire de respecter les conditions recommandées par l'AFGC :

III.4.1. Choix des constituants pour formulation

Notre étude s'appuie sur la variation du rapport G/S et l'incorporation des fillers calcaires, en substitution du volume du ciment à différents pourcentages tout en préservant Le reste des constituants.

Les données :

On a choisi un rapport G/S = 0.9 et un autre rapport qui vaut 1. Donc on aura ainsi deux formules de base à préparer avec :

- Le dosage en ciment vaut 400 Kg / m³
- Le rapport eau/liant (E/L) = 0.38
- Le dosage en superplastifiant SP est de 2% de la masse de ciment.

On fait remplacer par la suite à chaque fois un volume de ciment par le même volume de fillers calcaires. On a choisi trois valeurs de substitution : 20, 25 et 30% du volume de ciment. On aura 6 mélanges supplémentaires à préparer.

III.4.2. Calcul des composantes des mélanges pour 1 m³ de béton (1000 litres)

On prend, comme exemple de calcul détaillé, le rapport G/S = 0,9

L'eau E : $E/C = 0,38$ donc $E=C*0,38=400*0,38$

On trouve $E=152$ kg

Le super Plastifiant SP : $SP = 2\% \times C$ d'où $SP = 2\% \times 400 = 8$ Kg

L'extrait sec vaut 30% du super plastifiant, alors 70% représente la quantité d'eau Esp.

$Esp = 70\% \times 8 = 5,6$ kg qu'on doit retrancher de la quantité globale de l'eau.

Donc **la quantité d'Eau de gâchage est** : $Eg = E - Esp = 152 - 5,6$, on trouve $Eg = 146,4$ ℓ

Détermination du volume des granulats V_{gr} :

Sachant que le volume total unitaire est : $V_{total} = V_{p\hat{a}te} + V_{gr} + V_{air}$;

Avec : $V_{total} = 1m^3 = 1000$ ℓ et le volume des vides représente 2,5% du volume total, donc

$V_{air} = 25$ ℓ.

Le Volume de pâte $V_{p\hat{a}te}$ est la somme de :

$$V_{p\hat{a}te} = \frac{M_{ciment}}{\rho_c} + \frac{M_{super\ plastifiant}}{\rho_{sp}} + \frac{M_{eau}}{\rho_e} ,$$

(M représente la masse et ρ la masse volumique absolue)

On aura :

$$V_{p\hat{a}te} = \frac{400}{3,1} + \frac{146,4}{1} + \frac{8}{0,7}$$

1.

Donc le volume des granulats sera : $V_{granulats} = V_{total} - (V_{p\hat{a}te} + V_{air})$

$V_{granulats} = 1000 - (282,91 + 25)$ d'où $V_{granulats} = 692,09$ ℓ

Cette valeur représente la somme des volumes des graviers V_{gr} et sable V_s

Le dosage en masse du Sable : on sait que $\frac{G}{S} = 0,9$ et que $V_{granulats} = V_s + V_{gr}$, on aura :

$V_{gr} = V_s + 0,9 \times V_s \rightarrow V_s = \frac{692,09}{1,9} = 364,26$ ℓ, c'est le volume de Sable avec $\rho_s = 2,6$ Kg/ℓ ainsi sa masse est : **$M_{sable} = 948,3$ Kg**

Le dosage en masse des graviers :

on a le volume des graviers V_{gr} égal à $0,9 \times V_s$ alors **$V_{gr} = 328,73$ ℓ**

- $V_{gr} (3/8) = V_g \times 40\% = 328,83 \times 40\%$ qui vaut 131,13ℓ, avec $\rho_s = 2,6$ Kg/ℓ alors **$M = 344,94$ Kg**
- $V_{gr} (8/16) = V_g \times 60\% = 328,27 \times 60\%$ qui vaut 196,70ℓ avec $\rho_s = 2,67$ Kg/m³ alors **$M = 525,88$ Kg.**

Les dosages exprimés en masses sont récapitulés dans le tableau III.11.

De la même méthodologie de calcul, on détermine pour le rapport G/S=1 et pour les autres mélanges pour un mètre cube de béton et par la suite faire l'équivalent pour 36 ℓ de béton, quantité nécessaire pour la confection des éprouvettes.

Clarification :

Les indices des BAP présentés dans les tableaux III.11. Et III.12 sont comme suit :

Les indices 0,9 et 1 : représentent le rapport G/S

Les indices 0, 20, 25 et 30 : représentent le pourcentage des fillers calcaires.

Tableau III.11. Formulation des BAP pour le rapport G/S=0.9

Constituants	Quantité des BAP en Kg							
	BAP _{0,9-0}		BAP _{0,9-20}		BAP _{0,9-25}		BAP _{0,9-30}	
	1 m ³	36ℓ	1 m ³	36 ℓ	1 m ³	36 ℓ	1 m ³	36 ℓ
Ciment	400	14,4	320	12.08	300	11.5	280	10.91
Gravier 3/8	341.94	12.29	340.94	12.27	340.94	12.27	340.94	12.27
Gravier 8/16	525.88	18.931	525.19	18.9	525.19	18.9	525.19	18.9
Sable	948.08	34.13	947.08	34.1	947.08	34.1	947.08	34.1
Eau	145.5	5.23	146.4	5.28	146.4	5.28	146.4	5.28
Super plastifiant	8	0,288	8	0,29	8	0,29	8	0,29
Fillers calcaires	0	0	64.53	2.461	80.65	3.77	96.78	3.672

Tableau III.12. Formulation des BAP pour le rapport G/S=1

Constituants	Quantité des BAP en Kg							
	BAP ₁₋₀		BAP ₁₋₂₀		BAP ₁₋₂₅		BAP ₁₋₃₀	
	1 m ³	36 ℓ	1 m ³	36 ℓ	1 m ³	36 ℓ	1 m ³	36 ℓ
Ciment	400	14.4	320	12.08	300	11.5	280	10.91
Gravier 3/8	359.89	13.84	359.89	12.95	359.89	12.95	359.89	12.95
Gravier 8/16	554.37	20.76	554.37	19.95	554.37	19.95	554.37	19.95
Sable	899.73	34.65	899.73	32.39	899.73	32.39	899.73	32.39
Eau	146.4	5.234	146.4	5.28	146.4	5.28	146.4	5.28
Super plastifiant	8	0.28	8	0.29	8	0.29	8	0.29
Fillers calcaires	0	0	64.53	2.461	80.65	3.77	96.78	3.672

III.5. Procédures de fabrication des BAPs

Nous avons préparé ce BAP dans le laboratoire de génie civil à l'université Mohamed el Bachir el Ibrahim et les tests sont effectués au même laboratoire.

La préparation du béton auto plaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire.

Pour réaliser ce béton on suit le mode opératoire suivant

- Préparer les matériaux sèche (gravier, sable, ciment, les fillers de calcaire). Mettez ces matériaux dans le malaxeur et mélangez-les pendant 1,30min.
- Après avoir préparé la quantité d'eau et superplastifiant nécessaire en ajoutes attentivement et continue à malaxer pendant 3 minutes.

Alors la durée du malaxage est 4 min et 30 secs.

- Après l'arrêt de malaxage faire les essais immédiatement (l'étalement, l'écoulement, stabilité au tamis et le rhéomètre).
- Graissés les moules à l'aide d'huile pour faciliter le décoffrage. En remplir les éprouvettes par trois couches sans vibration, à chaque fois on fait mélanger le béton pour éviter la ségrégation et le ressuage.

III.6. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais

III.6.1. L'essai d'étalement au cône d'Abrams : [NFEN12 350-8]

L'essai de l'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton le matériel utilisé pour réaliser cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque. L'essai consiste à remplir le cône en une fois, puis soulever et de mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement. Plus le diamètre est grand, plus le BAP est fluide. Des valeurs de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP.

III.6.2. L'essai de la boîte en L : [NF EN 12 350-10]

La boîte en L permet de tester la mobilité de béton en milieu confiné et 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 en forme de L, puis en levant une trappe (séparant les parties verticale et horizontale de la boîte) de laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers des armatures de diamètre 12 mm. Après

écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticale (H_1 côté trappe) et horizontale (H_2).

Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage H_2/H_1 qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.

III.6.3. Stabilité au tamis : [NF EN 12 350-11]

Cet essai permet d'évaluer le risque de ségrégation statique et d'étudier le ressuage du BAP, qui doit être stable et conserver une composition homogène sous l'effet de la gravité.

Pour réaliser cet essai un seau et un tamis sont utilisés. Le tamis a une ouverture de maille de 5 mm.

L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- remplir un seau de 10 litres avec du béton ;
- le laisser reposer 15 minutes ;
- verser la partie supérieure (4,8 kg de béton \pm 0.2 kg) sur le tamis depuis une hauteur de 50 cm ;
- attendre 2 minutes puis peser la laitance qui est passée au travers le tamis ;
- calculer le pourcentage de laitance en divisant la masse de la laitance par la masse initiale du béton.

Plus le pourcentage de laitance est faible ($< 15\%$), plus la stabilité à la ségrégation statique est grande.

III.6.4. Essai rhéomètre

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

III.6.5 Confection des éprouvettes

III.6.5.1. type et taille des moules

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

- Moule prismatique (7×7×28).
- Cubique (10×10×10 cm).
- Cylindrique (16×32cm).

III.6.5.2. Conservation des éprouvettes

Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 24h après le coulage puis conservées sous l'eau à une température de 20°C.

III.7. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci

III.7.1. Les essais destructifs

III.7.1.1. La résistance à la compression

La résistance à la compression est la caractéristique la plus importante recherchée pour le béton durci. On classe le béton en fonction de sa résistance mécanique en compression mesurée à 7, 14 et 28 jours. Elle est exprimée en **MPa**.

III.7.1.2. La résistance à la traction par flexion

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.

III.7.2. Les essais non destructifs

III.7.2.1 Ultrason [NA EN 12504-4]

Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.. Plus la vitesse est grande plus le béton est bien résistant.

III.7.2.2. Essai au scléromètre [NA EN 12504-2]

Le scléromètre est un appareil qui mesure la " dureté au choc " du béton à la surface (Indice sclérométrique).

III.8. Conclusion

La formulation du béton est validée par un ensemble d'essais qui permettent de justifier sa conformité aux propriétés des bétons fluides.

L'épreuve d'étude en laboratoire consiste à fabriquer une gâchée nominale et un ensemble de gâchées correspondant à des formules dérivées, destinées à évaluer la sensibilité de la formule aux variations de composition.

Les principes de tous les essais sont conformes aux directives d'AFGC.

CHAPITRE IV

Résultats et interprétations

Chapitre IV

Résultats et interprétations

IV.1. Introduction

Les résultats des essais effectués au chapitre III, vont être traités dans ce qui suit. En effet, et à partir des mélanges obtenus, on doit procéder à l'analyse des résultats des différents essais afin de caractériser les BAP confectionnés.

IV.2. Résultats des essais de caractérisation des BAP

Les principales caractéristiques se développent à l'état frais et peuvent être décrites en termes de fluidité, de viscosité, de risque de blocage et de ségrégation et par la suite va se développer les caractéristiques à l'état durci.

IV.2.1. Résultats des essais à l'état frais

Le comportement du béton à l'état frais a des conséquences pratiques sur son comportement dans les structures à l'état durci. Il est donc nécessaire de contrôler les caractéristiques de ces bétons vis-à-vis de l'écoulement autoplaçant à l'état frais qui constitue une première condition pour garantir une application correcte de ce matériau.

IV.2.1.1. Résultats des essais spécifiques au béton autoplaçant

Les résultats des trois principaux (étalement, stabilité au tamis, écoulement ainsi que la densité) sont montrés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1. Résultats des essais à l'état frais

Type de BAP	L'étalement (cm)	Stabilité au tamis (%)	Écoulement (%)	Masse volumique de béton (kg/l)
BAP _{0,9-0}	70	1.64	80	2.32
BAP ₁₋₀	68	0.66	81	2.32
BAP _{0,9-20}	69	2.6	80	2.37
BAP ₁₋₂₀	67	2.5	97	2.34
BAP _{0,9-25}	67.5	8.6	89	2.35
BAP ₁₋₂₅	68	8.8	90	2.34
BAP _{0,9-30}	65	5.4	95	2.37
BAP ₁₋₃₀	68	3.2	88	2.36

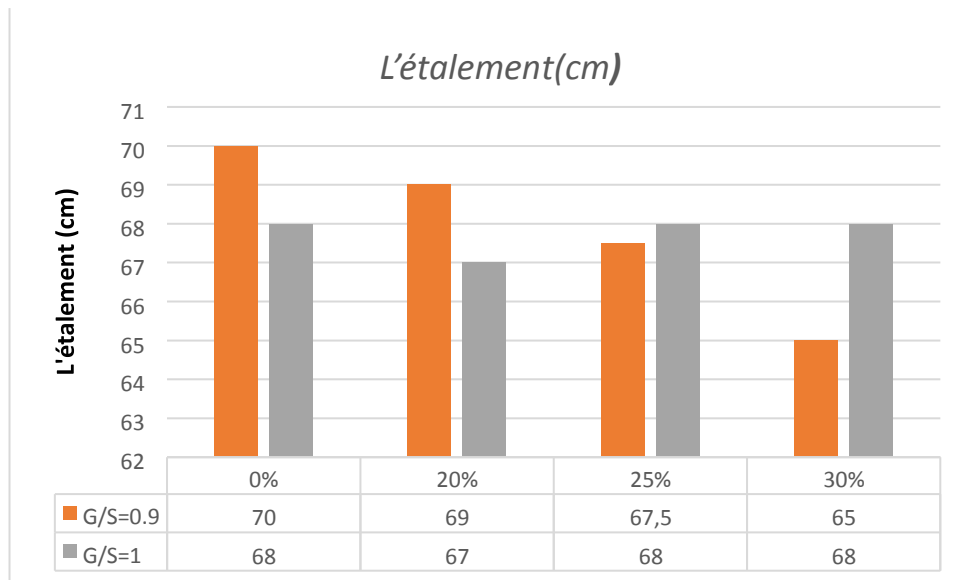


Figure IV.1. Résultats de l'essai d'étalement

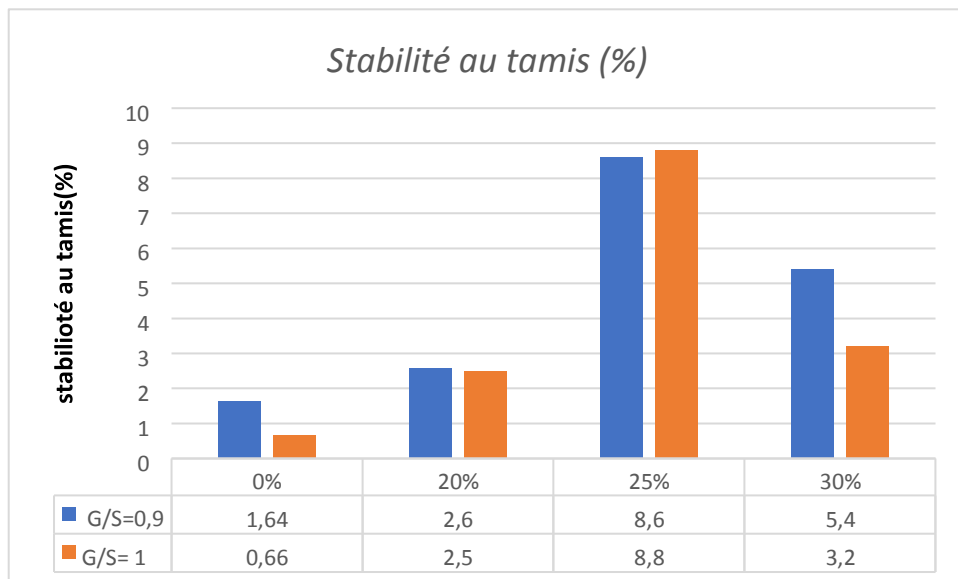


Figure IV.2. Résultats de l'essai de stabilité au tamis

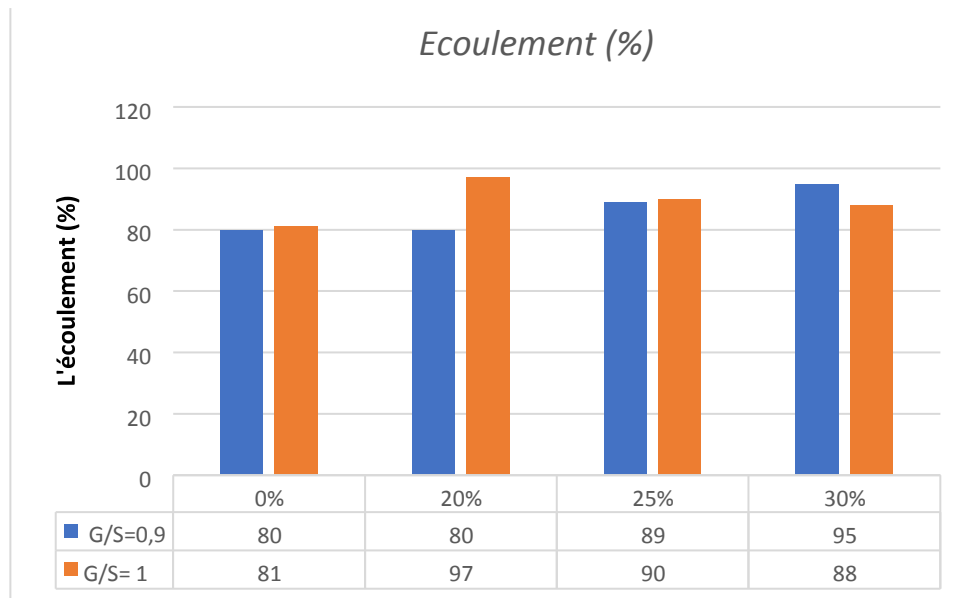


Figure IV.3. Résultats de l'essai d'écoulement

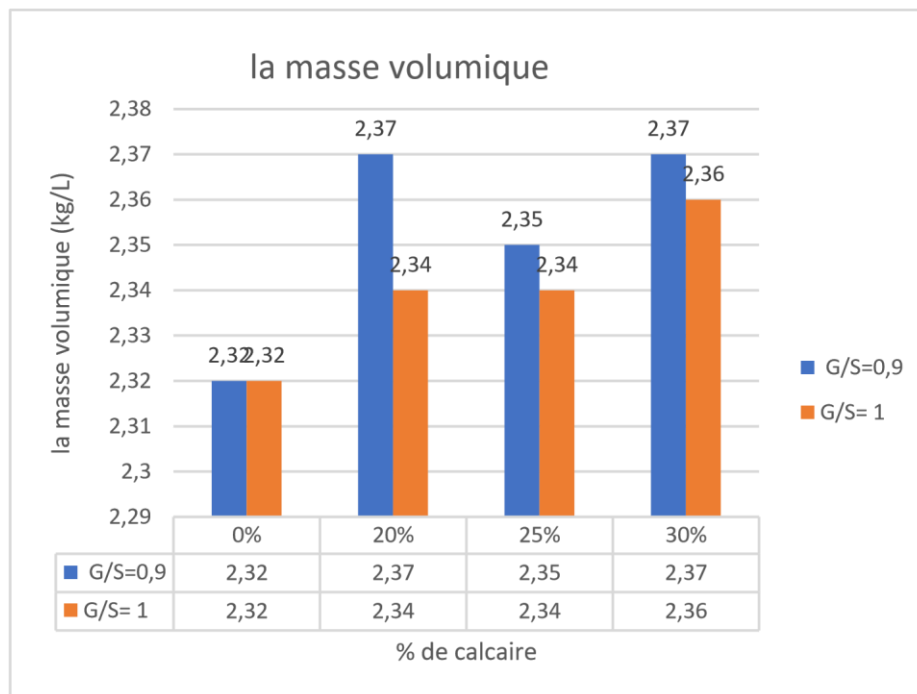


Figure IV.4. Les variations de la masse volumique

Commentaires

Les bétons autoplaçants présentent une grande fluidité sans ségrégation et sans ressuage, ce qui en fait d'ailleurs les caractéristiques. La présence d'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente pour la plupart des mélanges et pratiquement très faible (de 1 à 2 mm) pour d'autres. Par ailleurs, la matrice cimentaire a bien entraîné les gros granulats et ils n'ont pas été amoncelés au milieu des galettes de béton.

Nous pouvons constater que l'ensemble des BAP testés, respecte le critère d'étalement. Les valeurs spécifiées sont comprises entre 65 et 70 cm et qui sont associées aux mélanges **BAP_{0,930}** et **BAP_{0,9-0}** respectivement.

Les résultats d'essai pour la boîte en L présentés dans le tableau IV.1 montrent clairement que les bétons présentent des rapports satisfaisants compris entre 80 à 95 (toutes les valeurs sont supérieures à 80%). Quant aux résultats de stabilité au tamis, tous les BAP ont un taux de ségrégation (laitance) inférieur à 15 % ce qui exprime une bonne stabilité.

L'ajout de 20% et 25% de filler calcaire améliore toutes les caractéristiques à l'état frais et donne les meilleurs résultats d'étalement et d'écoulement.

L'ajout de 30% de calcaire diminue l'étalement et l'écoulement et donne une meilleure stabilité au tamis avec une densité qui diminue jusqu'à 2.36.

Le changement du rapport G/S permet d'améliorer les caractéristiques fraîches. On conclut que plus le G/S est inférieur plus l'étalement et l'écoulement augmentent.

IV.2.1.2. Comportement rhéologique des BAP

La caractérisation de l'ouvrabilité du béton nécessite la mesure de deux grandeurs :

Son seuil de cisaillement τ_0 et sa viscosité μ .

En effet, pour mettre en œuvre le béton facilement (béton pompable, facilité d'insertion de la cage d'armatures), son seuil de cisaillement doit être faible et sa viscosité modérée. Par ailleurs, pour assurer une certaine robustesse à la formulation (résistance à la ségrégation), la viscosité du béton doit être modérée. Pour quantifier ces paramètres, un rhéomètre rotatif type ICAR a été utilisé dans cette étude. Ce rhéomètre est piloté à l'aide d'un logiciel où des diagrammes de vitesse-couple seront affichés (on cite comme exemples le **BAP_{0,9_0}** et **BAP_{1_0}** illustrés dans la figure IV.6).

Tableau IV.2. Caractéristiques rhéologiques des différents BAP mesurés par le rhéomètre

La viscosité(Pa.s)			
G/S=0.9		G/S=1	
BAP_{0,9-0}	66.51	BAP₁₋₀	58.54
BAP_{0,9-20}	51.07	BAP₁₋₂₀	86.20
BAP_{0,9-25}	87.26	BAP₁₋₂₅	85.07

BAP_{0,9-30}	70.86	BAP₁₋₃₀	94.41
-----------------------------	--------------	---------------------------	--------------

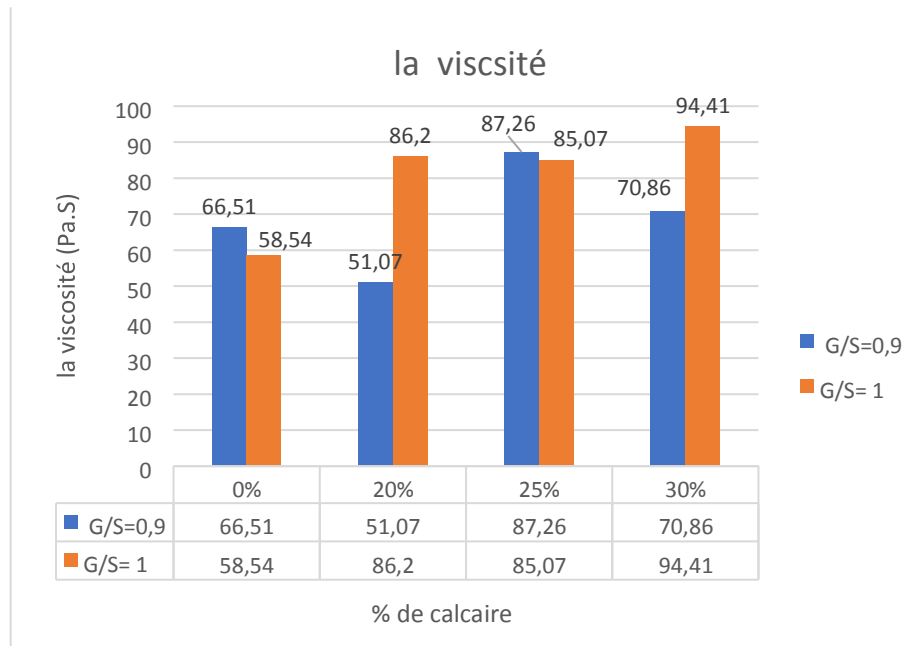


Figure IV.5. Les variations de la viscosité

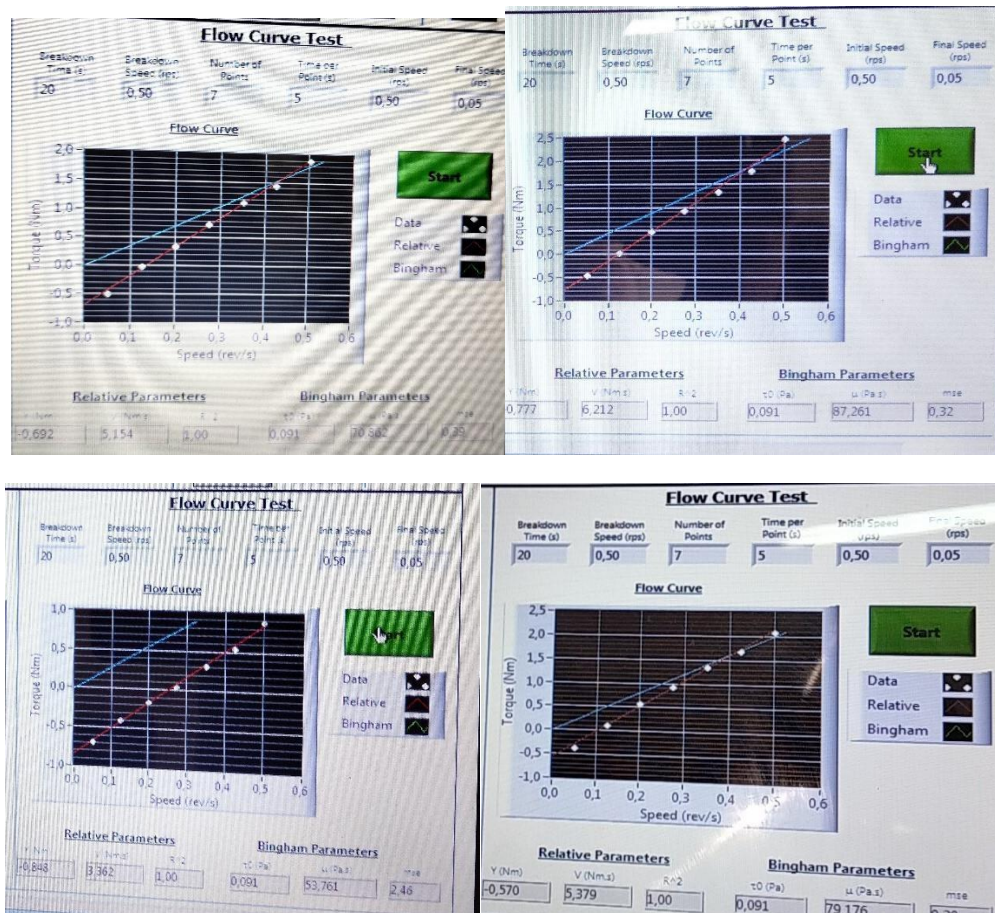


Figure IV.6. Exemples de Diagrammes de vitesse-couple (Speed-Torque)

Commentaires :

Le comportement rhéologique d'un PAP avec les différents pourcentages de fillers calcaires est illustré dans les tableaux et les figures ci-dessus. le mélange $BAP_{0,9-20}$ marque la valeur estimée qui vaut 51 Pa.s, contrairement au mélange BAP_{1-30} où sa viscosité est la plus élevée ($\mu=94.41\text{pa.s}$).

Il est possible de conclure que la viscosité est proportionnelle au pourcentage des fillers calcaires sauf pour le mélange $BAP_{0,9-20}$. L'incorporation de filler calcaire entraîne une augmentation de la viscosité et offre une viscosité supérieure à celle des bétons témoins (sans ajout).

La viscosité du béton autoplaçant dépend de la nature du filler calcaire, de sa granulométrie et de la finesse du ciment utilisé.

IV.2.2. Résultats des essais à l'état durci**IV.2.2.1. les essais destructifs****IV.2.2.1.1. La résistance à la compression**

Les résultats trouvés sont représentés dans ce qui suit.

Tableau IV.3. La résistance à la compression

Type de	La résistance à la compression (MPa)		
	7J	14 J	28 J
BAP_{0,9-0}	33.63	33.38	42.33
BAP₁₋₀	42 .63	46.90	55.69
BAP_{0,9-20}	25.897	34.117	37.385
BAP₁₋₂₀	29.820	26.381	39.391
BAP_{0,9-25}	33.44	31 .766	39.524
BAP₁₋₂₅	31.423	32.235	36.587
BAP_{0,9-30}	25.848	26.882	37.216
BAP₁₋₃₀	29.073	31 .087	39 .637

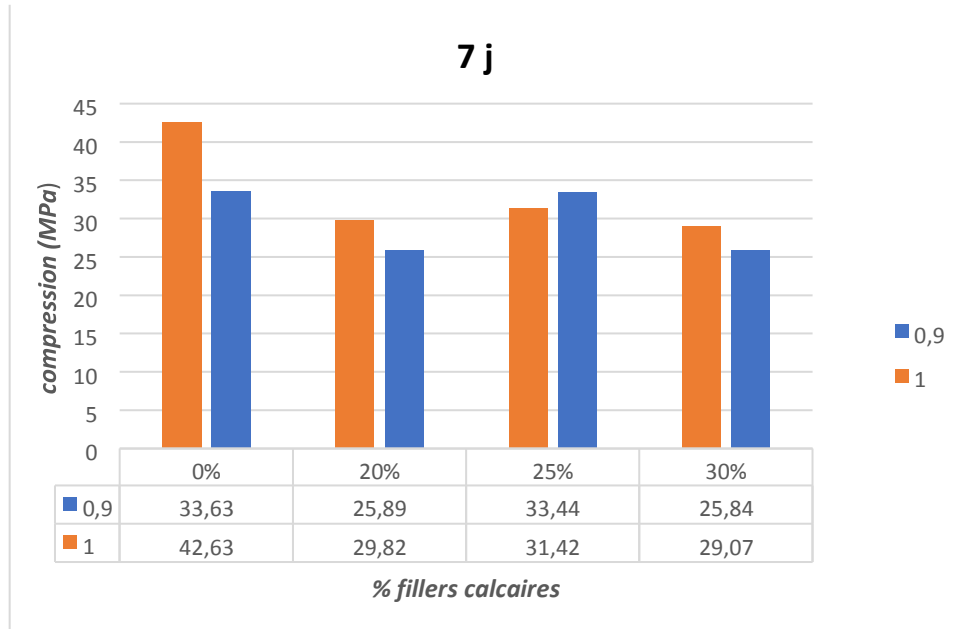


Figure IV.7. La résistance à la compression à 7j

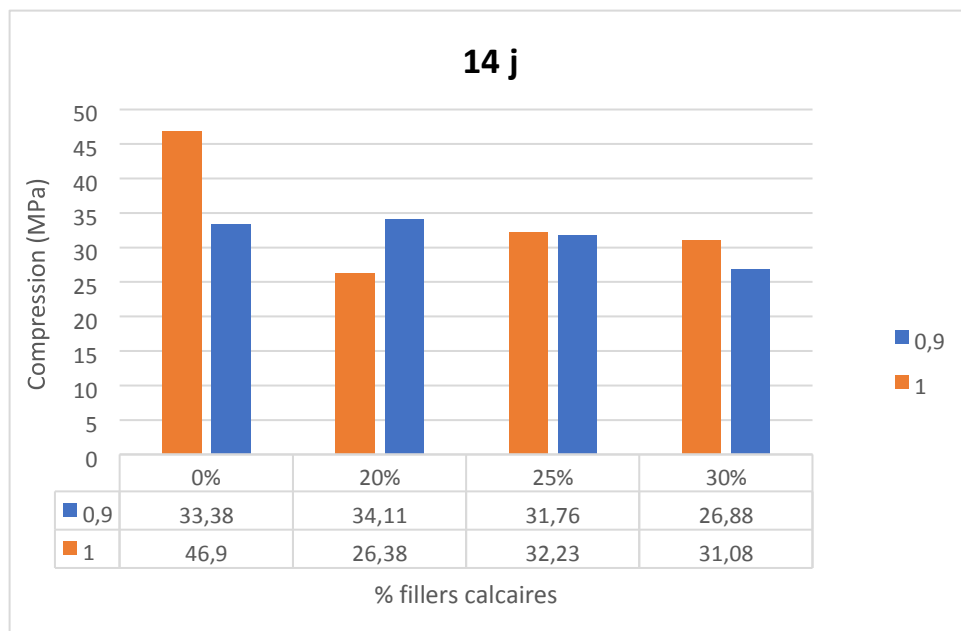


Figure IV.8. La résistance à la compression à 14j

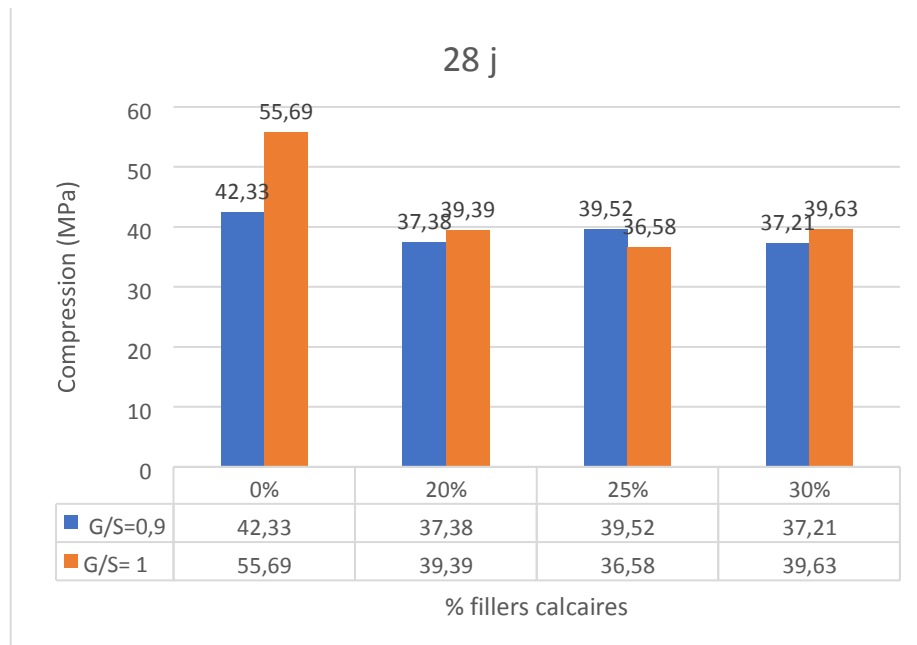


Figure IV.9. La résistance à la compression à 28j

Commentaires :

Il est remarquable que les bétons sans ajouts offrent les meilleurs résultats, mais on peut constater que pour les bétons incorporés en fillers calcaires, les résistances sont pratiquement proches.

Il est également possible de constater que les résistances à la compression ne sont pas très différentes et sont compris entre 42 et 55Mpa,

Le rapport G/S = 1 est généralement offre des résistances plus élevées que celui de 0,9.

IV.2.2.1.2. La résistance à la traction par flexion

Le tableau suivant récapitule les résultats trouvés :

Tableau.IV.4. Résultats de la résistance à la flexion

La résistance à la traction par flexion (MPa)			
Type de BAP	7J	14J	28J
BAP0,9-0	6.06	6.21	6.42
BAP1-0	6.86	6.86	7.10
BAP0,9-20	5.21	5.45	6.49
BAP1-20	4.91	5.41	5.13
BAP0,9-25	5.49	6.11	5.96
BAP1-25	5.39	5.21	5.87
BAP0,9-30	6.23	5.42	5.65
BAP1-30	5.46	5.46	5.20

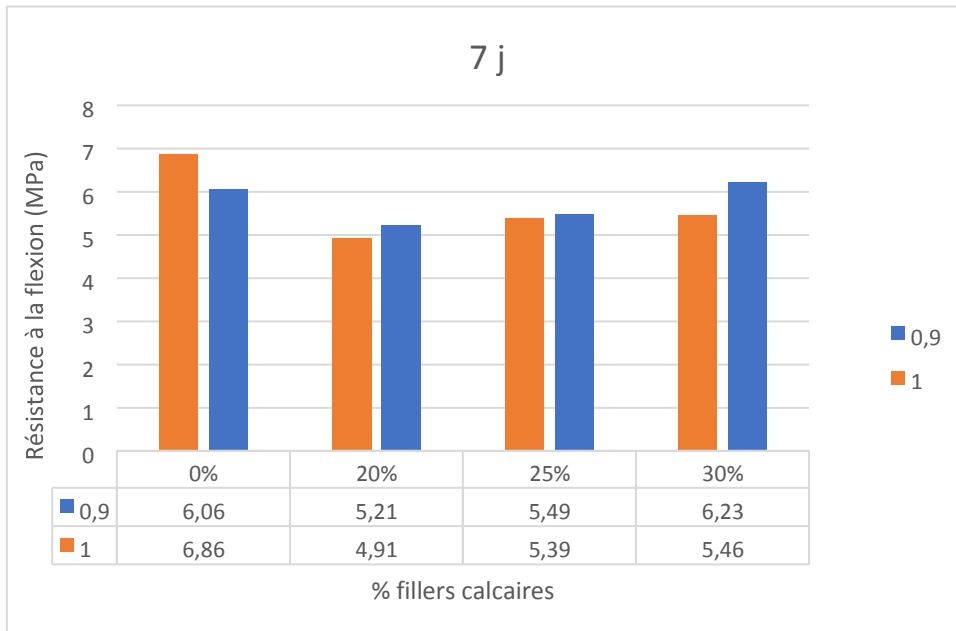


Figure IV.10. La résistance à la flexion à 7j

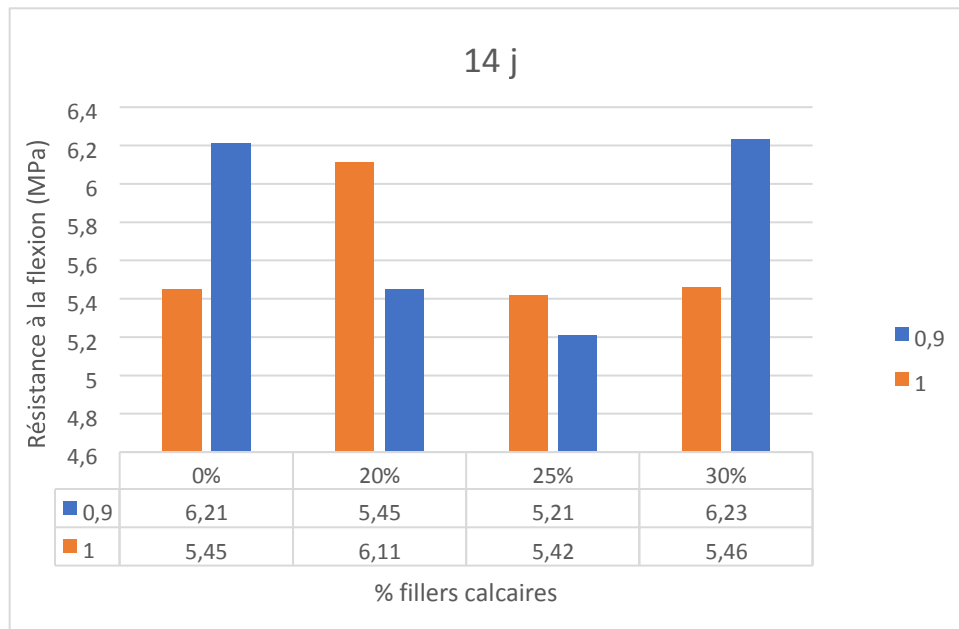


Figure IV.11. La résistance à la flexion à 14j

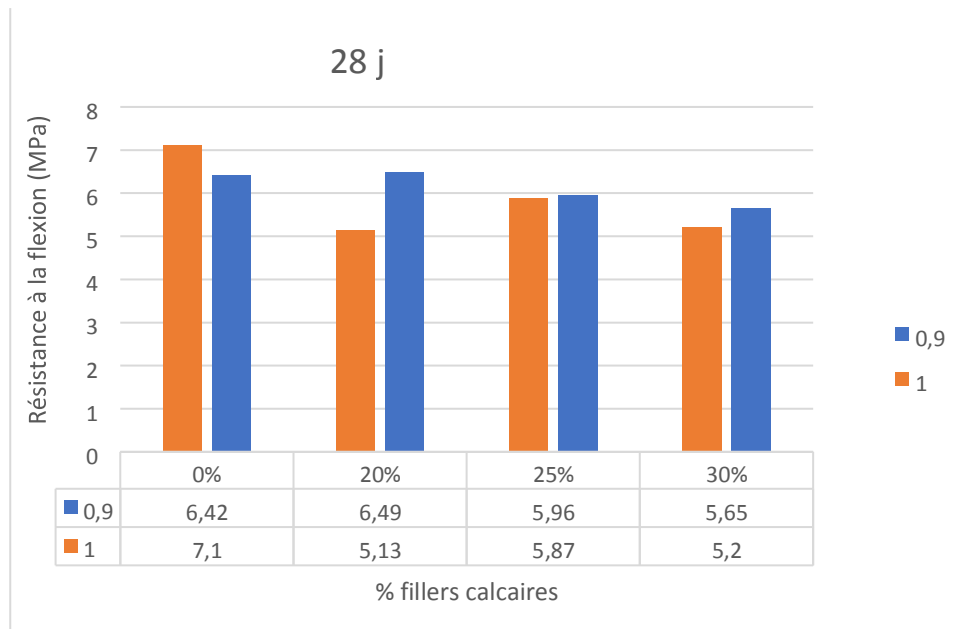


Figure IV.12. La résistance à la flexion à 28j

Commentaires :

Il est intéressant de constater que nos BAP offrent des résultats remarquables, avec des résistances similaires pour tous les mélanges. Donc, l'emploi du filler calcaire présente des avantages pour les bétons autoplaçants en ce qui concerne la flexion.

IV.2.2.2. Résultats des essais non destructifs

Des tests d'auscultation dynamique ont été réalisés afin d'évaluer la vitesse de propagation des ultrasons, ainsi que des essais au scléromètre pour évaluer la résistance en utilisant l'indice sclérotique I_s , sur des éprouvettes cylindriques après 28 jours d'immersion. Le tableau ci après résume les résultats obtenus qui seront illustrés par des histogrammes.

Tableau IV.5. la vitesse de propagation des ultras son pour les BAP à 28 jours

Type de BAP	Vitesse de propagation (m/s)	Résistance par scléromètre R_s (MPa)
BAP_{0,9-0}	4261	38
BAP₁₋₀	3131	35
BAP_{0,9-20}	4604	38
BAP₁₋₂₀	3168	39
BAP_{0,9-25}	3165	30
BAP₁₋₂₅	3137	33
BAP_{0,9-30}	3168	32
BAP₁₋₃₀	3152	26

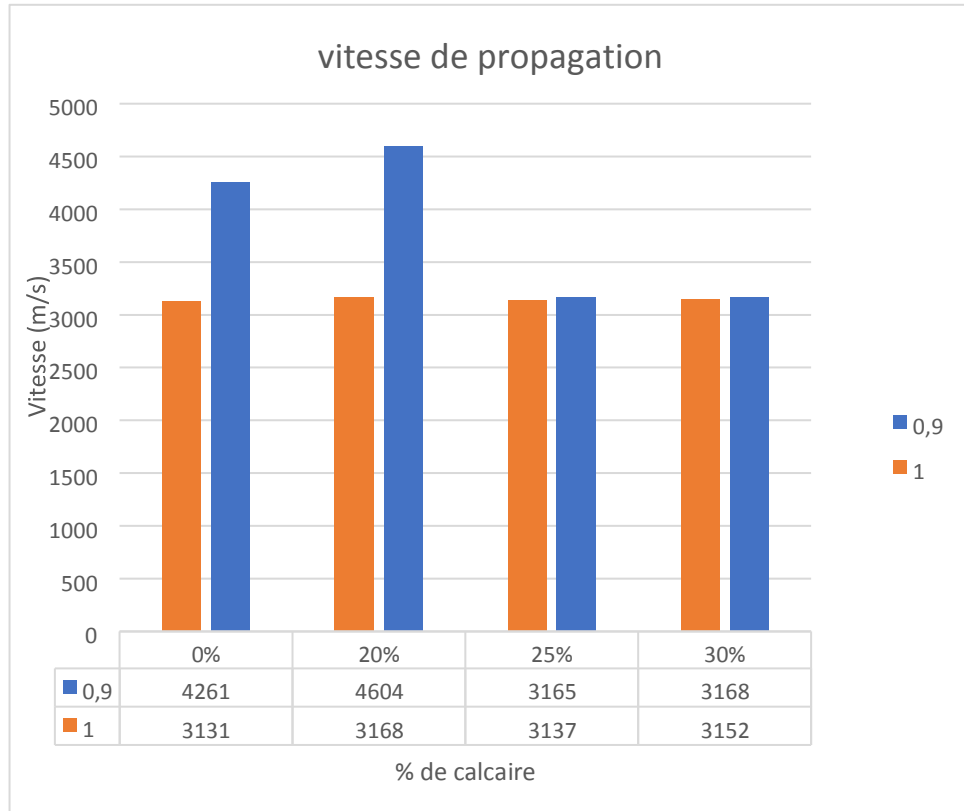


Figure IV.13. Vitesse du son des différents types de béton

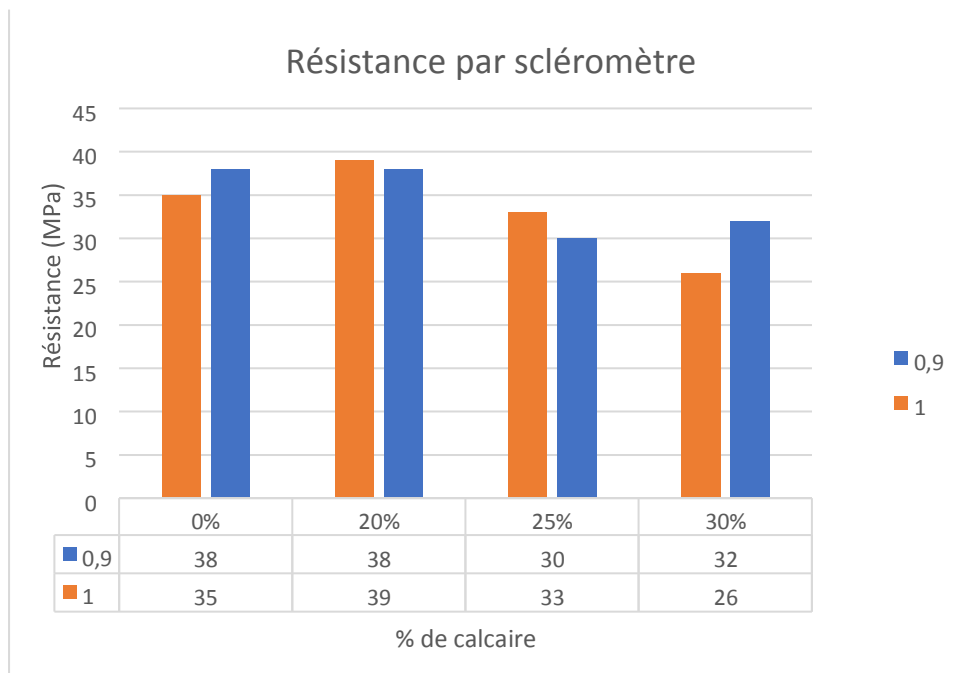


Figure IV.14. Histogrammes des résistances au scléromètre

Commentaires

D'après les résultats présentés dans le tableau IV.5 et la figure IV.13, il est observé que la vitesse de propagation du son de tous les types de béton dépasse 4200 m/s, ce qui indique une résistance élevée.

Les vides (la masse volumique) et l'homogénéité des granulats, ainsi que leur étalement efficace, ainsi que leur écoulement et leur résistance à la ségrégation dans les bétons, peuvent expliquer ces résultats. Étant donné que l'élévation de la vitesse de son est associée à la réduction des espaces internes afin d'obtenir un résultat satisfaisant.

IV.6. Conclusion

L'objectif principal de cette étude est d'analyser les caractéristiques rhéologiques et mécaniques d'un béton autoplaçant en ajoutant des additifs minéraux (des fillers de calcaire) à de pourcentages variés. L'objectif est de déterminer l'impact de la nature et du pourcentage des additifs sur les caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci.

La présence de filler de calcaire en remplacement partiel du ciment peut être considérée comme avantageuse pour certains dosages inférieurs à 30% de la masse de ciment.

Conclusion générale

Cette étude vise à évaluer les caractéristiques rhéologiques et mécaniques d'un béton autoplaçant en ajoutant des additions minérales locales telles que les fillers calcaires (FC) à des pourcentages variés de 20, 25 et 30%, en remplacement partiel du volume de ciment. L'objectif est de déterminer l'impact de la nature et du pourcentage des additions sur les caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci.

- L'ajout de FC peut être considéré comme avantageux pour certains dosages, allant jusqu'à 30%
- Les résultats obtenus à l'état frais et à l'état durci sont satisfaisants avec une substitution de 20% et 25%, ainsi qu'une résistance accrue à l'état jeune. En incorporant 30% de calcaire, l'étalement et l'écoulement ont été réduits, ce qui a entraîné une résistance à la compression inférieure à 40 MPa.
- l'emploi du filler calcaire présente des avantages pour les bétons autoplaçants en ce qui concerne la flexion.
- Un rapport G/S en dessous de 1 entraîne une augmentation de l'étalement et de l'écoulement, tandis qu'un rapport proche de 1 entraîne une augmentation de la résistance à la compression.
- La modification de la viscosité par l'ajout de filler calcaire augmente de 51 Pa.s pour le BAP_{0,9-0} (sans ajouts) jusqu'à 94 Pa.s pour le BAP₁₋₃₀.
- Il est dit que notre formulation offre des résultats très satisfaisants en ce qui concerne le seuil de cisaillement. En ajoutant 20% de calcaire, la densité diminue jusqu'à 2,1 et augmente progressivement avec le temps jusqu'à 28 jours.

Il est fortement recommandé d'élaborer d'autres recherches avec des rapports de G/S < 0,9 et avec d'autres types d'additions minérales ou de déchets industriels pour des raisons tout d'abord technique puis économiques, écologiques et environnementales.

Références bibliographiques

- [1] Okamura H., Ouchi M., « Self- compacting high performance concrete », Engineering, Materials Science, 1997.
- [2] Tout sur le béton, Le Béton Autoplaçant Disponible sur <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-beton-autoplaçant-avantages-utilisations-pose/> (consulté: avril 2024).
- [3] F. Dehn, K. Holschemacher, D. Weisse, Self-compacting concrete (SCC) time development of the material properties and the bond behaviour, LACER (Leipzig Annu. Civ. Eng. Report). 115–124, (2000).
- [4] Boukni Bariza, *Tenue au Feu des Bétons Autoplaçants*, Mémoire de Magister, université Mentouri, constantine, 2007, 159p.
- [5] Soumia Kheira SEBSADJI, « Nouvelle approche pour la formulation des BAP », AJCE, vol 37, No 1 (2019): Special Issue - RUGC 2019 Sophia Antipolis p 246-250.
- [6] P. ROUGEAU, CH MARRY DIPPE, O. FRANCY, Les BAP : synthèse des connaissances et campagne expérimentale, CERIB, février 2001.
- [7] Haddad Kahina, les BAP à la base des granulats de béton de démolition résistance et approche de la durabilité, mémoire de master, UMMTO, Tizi Ouzou, 2011.
- [8] BETHMONT S. « Mécanismes de ségrégation dans les BAP ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris, 2005, 159p.
- [9] P. Torcy, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants Influence de la formulation ». Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nante, 2003, 223p.
- [10] Hanna Farès, Propriétés mécaniques et physicochimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée, Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise, 2009, 192p.
- [11] Site web: <http://www.infociments.fr/>.
- [12] H. Akçaözöğlü, et al. "Effets de la poudre de calcaire sur les propriétés fraîches et durcies du béton autoplaçant ". Construction et matériaux de construction, (2014).
- [13] M. Sonebi, et al.. "Effets de la poudre de calcaire sur les propriétés fraîches et durcies du béton autoplaçant " Construction et matériaux de construction, (2012) .
- [14] F. Pacheco Torgal, et al. "Comportement chimique et mécanique des ciments composés avec charges calcaires ". Construction et matériaux de construction, (2011).
- [15] P. M. J. Delgado, et al. "Effet des fillers calcaires et des adjuvants modificateurs de viscosité sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants ". Composites de ciment et de béton. (2009).
- [16] A. M. Rashad, et al. "Effet de la poudre de calcaire en remplacement partiel du sable de carrière concassé sur les propriétés des mortiers de réparation autoplaçants ". Construction et matériaux de construction, (2008).

