

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

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

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie Civil

Mémoire

Présenté pour l'obtention

DU DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Par

➤ **Laifaoui Maamar**

➤ **Aoukli Hamza**

➤ *Intitulé*

**Analyse de la performance d'un béton autoplaçant à base de poudre de
céramique**

Soutenu le : 20 Juin 2024

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mme BOURAHLI Amel</i>	<i>MCA</i>	<i>Présidente</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme TABET Souad</i>	<i>MAA</i>	<i>Encadrante</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme HAMLIA Wafa</i>	<i>MAB</i>	<i>Examinatrice</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.GUELMINE Layachi</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2023/2024

Remerciement

Tout d'abord,

Nous tenons à remercier *Allah*, le Clément et le Miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous voudrions exprimer nos vifs remerciements à nos très chers parents que Dieu les protège pour tout ce qu'ils ont fait pour nous amener à ce moment.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à Mme TABET S. pour avoir encadré et dirigé ce travail.

Un grand merci à tous les profs de département de génie civil et à tous ceux qui ont contribué à notre succès tout au long du parcours académique.

Dédicace

C'est avec un immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents. A mes frères et mes sœurs

A toute ma famille.

A mes amis

A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour

être un jour avec un master en génie civil

Laifaoui Maamar

Dédicace

C'est avec un immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents. A mes frères et mes sœurs

A toute ma famille.

A mes amis

*A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour
être un jour avec un master en génie civil*

Aoukli Hamza

Sommaire

Liste des figures	i
Liste des tableaux	ii
Liste des abréviations	iii
Résumé – Abstract – ملخص	iv
Introduction générale	1

Chapitre I

Caractérisation du béton autoplaçant

I.1 Introduction	2
I.2. Définition <i>de</i> BAP	2
I.3. Domaine d'utilisation des BAP	2
I.4. Avantages du béton autoplaçant	3
I.4.1. Avantages techniques	3
I.4.2. Avantages économiques	3
I.4.3. Avantages écologiques	3
I.5. La spécificité de la composition des BAP	4
I.5.1. Un volume de pâte élevé	4
I.5.2. Une quantité de fines élevée	4
I.5.3. L'utilisation de superplastifiants	4
I.5.4. Un faible volume de gravillons	4
I.5.5. Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité)	5
I.6. Constituants des BAP	5
I.6.1. Le ciment	6
I.6.2. Les granulats	6
I.6.3. Les ajouts minéraux	6
I.6.3.1. La poudre de céramique	7
I.6.4. L'eau de gâchage	7
I.6.5. Les adjuvants	7
I.6.5.1. Les superplastifiants	7
I.6.5.1.1. L'emploi de superplastifiants	7
I.7. Les agents de viscosité	8
I.8. Propriétés des BAP	8
I.8.1. À l'état frais	8
I.8.2. À l'état durci	9
I.9. Différentes approches de formulation des BAPs	9
I.9.1. Approche empirique	9
I.9.2. Approche de la méthode des boîtes	9

I.9.3. Approche de la méthode des pâtes	9
I.9.4. Approche basée sur des modèles de comportement rhéologique	10
I.10. Conclusion	10

Chapitre II

Etat de l'art sur le béton autoplaçant

II.1. Introduction	11
II.2. La rhéologie d'un BAP	11
II.2.1. Le comportement rhéologique d'un BAP	11
II.2.2. Les grandeurs de rhéologie	11
II.2.2.1. Contrainte de cisaillement τ (Pa)	12
II.2.2.2. Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	12
II.2.2.3. Viscosité dynamique μ (Pa.s)	12
II.2.2.4. Seuil de cisaillement τ_0	12
II.3. Caractérisation des BAP à l'état frais	13
II.3.1. Essai d'étalement	13
II.3.2. Essai de boîte en L	13
II.3.3. Essai de stabilité au tamis	13
II.3.4. Le rhéomètre	14
II.4. Caractérisation des BAP à l'état durci	14
II.4.1 Les essais destructifs	14
II.4.1.1. La résistance à la compression	14
II.4.1.2. La résistance à la traction par flexion	14
II.4.2. Les essais non destructifs	14
II.4.2.1. Essai de scléromètre	14
II.4.2.2. Essai d'auscultation sonique	15
II.5. État de l'art sur béton autoplaçant	15
II.5.1. Formulation et composition des mélanges	15
II.5.2. Rhéologie et comportement frais	15
II.5.3. Propriétés mécaniques et durabilité	15
II.5.4. Incorporation de matériaux durables	16
II.5.5. Applications et techniques de mise en œuvre	16
II.5.6. Normalisation et réglementation	16
II.6. Analyse de l'influence des additions minérales sur le béton autoplaçant	16
II.6.1. Amélioration de la rhéologie	16
II.6.2. Optimisation de la granulométrie des particules	16
II.6.3. Amélioration des propriétés mécaniques	17
II.6.4. Réduction de la chaleur d'hydratation	17

II.6.5. Amélioration de la durabilité	17
II.7. Travaux de recherche sur les bétons autoplaçants	17
II.8. Conclusion	18

Chapitre III

Identification des matériaux utilisés et formulation

III.1. Introduction	19
III.2. Présentation des matériaux utilisés	19
III.3. Caractéristiques des matériaux utilisés	19
III.3.1 Le sable	19
III.3.1.1. Essai d'analyse granulométrique	19
III.3.1.2 Les caractéristiques physiques	21
III.3.2. Gravier	22
III.3.2.1 Analyse granulométrique	22
III.3.2.2. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés	23
III.3.2.3 Les caractéristiques mécaniques du gravier	23
III.3.3. Ciment (CEM II/B 42,5)	24
III.3.3.1 Caractérisation chimique et minéralogique du ciment utilisé (CEM II/B)	24
III.3.3.2. Caractéristiques physiques du ciment utilisé	24
<i>Tableau III.8. Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5</i>	25
III.3.4. Poudre de céramique	25
III.3.5. Les adjuvants	25
III.3.5.1. Définition	25
III.3.6. L'eau de gâchage	26
III.4. Formulation de béton auto plaçant par la méthode AFGC	26
III.4.1. Choix des constituants pour formuler notre BAP	26
III.4.2. Calcul des composantes des mélanges pour un mètre cube (1000 litres)	27
III.5. Procédures de fabrication des BAP	28
III.6. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais	29
III.6.1. L'essai d'étalement au cône d'Abrams	29
III.6.2. L'essai de la boîte en L	29
III.6.3. Stabilité au tamis	30
III.6.4. Essai rhéomètre	30
III.7. Confection des éprouvettes	31
III.7.1. Type et taille des moules	31
III.7.2. Conservation des éprouvettes	31
III.8. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci	31
III.8.1. Les essais destructifs	31

III.8.1.1. La résistance à la compression.....	31
III.8.1.2. La résistance à la traction par flexion	32
III.8.2. Les essais non destructifs	32
III.8.2.1. Ultrason.....	32
III.8.2.2. Essai de scléromètre.....	33
III.9. Conclusion	33

Chapitre IV
Résultats et analyses

IV.1. Introduction	34
IV.2. Résultats des essais à l'état frais	34
IV.2.1 Résultats des essais de caractérisation des BAP	34
IV.2.1.1. Comportement rhéologique des BAP.....	37
IV.3. Résultats des essais à l'état durci	40
IV.3.1. Les essais destructifs	40
IV.3.1.1. La résistance à la compression	40
IV.3.2. Les essais non destructifs	46
IV.4. Conclusion	48
Conclusion générale	48
Références bibliographiques	48

LISTE DES FIGURES

FIGURE.I.1. PHENOMENE DE BLOCAGE DES GRANULATS AU DROIT D'UN OBSTACLE.	5
FIGURE .I.2. COMPOSITION D'UN BETON ORDIN (BO) ET D'UN BAP	5
FIGURE .I.3. ACTION DES SUPERPLASTIFIANTS - DEFLOCCULATION DES GRAINS DE CIMENT	8
FIGURE .III.1. COURBE GRANULOMETRIQUE DU SABLE OUED SOUF	20
FIGURE .III.2. COURBES GRANULOMETRIQUES DU GRAVIER 8/16 ET 3/8	23
FIGURE .III.3. DETERMINATION DU POINT DE SATURATION AU MINI CONE	26
FIGURE .III.4. L'ESSAI D'ETALEMENT (LABORATOIR DE GENIE CIVIL)	29
FIGURE III .5. L'ESSAI DE LA BOITE EN L (LABORATOIRE DE GC)	30
FIGURE III.6. L'ESSAI DE STABILITE AU TAMIS (LABORATOIRE GC)	30
FIGURE III.7. ESSAI RHEOMETRE (LABORATOIRE DE GC)	31
FIGURE III.8. L'ESSAI DE COMPRESSION (LABORATOIRE DE GC)	32
FIGURE III .9. L'ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION (LABORATOIRE DE GC)	32
FIGUREIII.10.L'ESSAID'ULTRASON(LABORATOIREGC)	33
FIGUREIII.12.L'ESSAI DESCLEROMETRE(LABORATOIREGC)	33
FIGURE.IV.1. RESULTATS DE L'ESSAI DE L'ETALEMENT	35
FIGURE IV.2. RESULTATS DE L'ESSAI DE L'ECOULEMENT	35
FIGURE IV.3. RESULTATS DE L'ESSAI DE STABILITE AU TAMIS	36
FIGURE IV.4. LES VARIATIONS DE LA MASSE VOLUMIQUE DES DIFFERENTS BAP FORMULES	36
FIGUREIV.5. DIAGRAMMEDEVITESSE-COUPLE(SPEED-TORQUE) POURG/S=0,9	38
FIGUREIV.6.DIAGRAMME DEVITESSE-COUPLE (SPEED-TORQUE)POUR LERAPPORT G/S= 1	39
FIGUREIV.7. LES VARIATIONS DE LA VISCOSITE DES DIFFERENTS BAP FORMULES	40
FIGURE IV.8. RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BAP A 7 JOURS	41
FIGURE IV.9. RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BAP A 14 JOURS	42
FIGURE IV.10. RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BAP A 28 JOUR	42
FIGURE.IV.11. HISTOGRAMMES DES RESISTANCES A LA FLEXION DU BAP A 7 JOUR	44
FIGURE.IV.12. HISTOGRAMMES DES RESISTANCES A LA FLEXION DU BAP A 14 JOUR	45
FIGURE.IV.13. HISTOGRAMMES DES RESISTANCES A LA FLEXION DU BAP A 28 JOURS	45
FIGURE IV.14. VITESSE DU SON DES DIFFERENTS TYPES DE BETON	47
FIGURE IV.15. HISTOGRAMMES DES RESISTANCES AU SCLEROMETRE	48

Liste de tableaux

TABLEAU III. 1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE	20
TABLEAU III.2. CLASSIFICATION DU SABLE EN FONCTION DU MODULE DE FINESSE	21
TABLEAU III.3 LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SABLE UTILISE	21
TABLEAU III.4. L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER 3/8 ET 8/16	22
TABLEAU III.5. LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU GRAVIER UTILISE	23
TABLEAU III.6. CLASSIFICATION DES ROCHES EN FONCTION DU COEFFICIENT LA:	24
TABLEAU III.7. LES COMPOSITIONS CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DU CEM II/B 42.5	24
TABLEAU III.8. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU CEM II/B 42,5	24
TABLEAU. III.9. CARACTERISTIQUES DE L'ADJUVANT « MEDAFLOW 30 »	25
TABLEAU III.10. FORMULATION DES BAP	28
TABLEAU IV.1. RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS	34
TABLEAU IV.2. RESULTATS DE LA VISCOSITE	39
TABLEAU IV.3. LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BAP	41
TABLEAU.IV.4. RESULTATS DE LA RESISTANCE A LA FLEXION	43
TABLEAU IV.5. LA VITESSE DE PROPAGATION DES ULTRASSONS POUR LES BAP A 28 JOURS	46

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**: est le rapport gravier/sable.
- **E**: Eau.
- **C**: Ciment.

Résumé

Notre recherche est basée sur une étude expérimentale d'un béton autoplaçant, où on va analyser l'influence du rapport G/S ainsi que l'incorporation des déchets de céramique en poudre fine (PC), sur ces performances rhéologiques et mécaniques. On a choisi les valeurs 1 et 0,9 pour le rapport G/S. Le ciment est remplacé partiellement par le même volume de poudre de céramique par différents pourcentages (20, 25 et 30%).

L'ajout de (PC) est très bénéfique pour certains dosages jusqu'à 30% et les mélanges étaient suffisamment fluides pour avoir une viscosité aussi bonne.

Mots clés: béton autoplaçant–rhéologie–Poudre de céramique – rhéomètre - viscosité

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 as well as the incorporation of ceramic waste in fine powder (PC), on these rheological and mechanical performances. We chose the values 1 and 0.9 for the G/S ratio. The ceramic powder is partially replaced by the same volume of cement in different percentages (20, 25 and 30%).

The addition of (PC) is very beneficial for certain dosages up to 30% and the mixtures were fluid enough to have such good viscosity.

Keywords: self-compacting concrete – rheology – rheometer – ceramic powder - viscosity.

ملخص

يعتمد بحثنا على الدراسة التجريبية للخرسانة ذاتية الضغط ، حيث سنقوم بتحليل تأثير

نسبة G/S، و نختار القيمتين 1 و 0.9، على هذه العروض الريولوجية و الميكانيكية ، وذلك عن طريق استبدال كتلة الأسمنت جزئياً بنسب مختلفة (20 و 25 و 30%) من مسحوق السيراميك (PC) ، المستخدمة في مجال البناء. إضافة PC مفيد جداً لقيم معينة تصل إلى 30%. كانت المخاليط سائلة بدرجة كافية للحصول على مثل هذه اللزوجة الجيدة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المضغوطة ذاتياً - الريولوجيا - مقياس الانسيابية-مسحوق السيراميك - اللزوجة.

Introduction générale

Introduction générale

Le béton autoplaçant, aussi connu sous le nom de (BAP), est un béton novateur qui a été créé dans les années quatre-vingt afin de satisfaire les exigences de l'industrie de la construction. À la différence des bétons classiques, le BAP se distingue par sa capacité à se déplacer facilement dans les coffrages, sans qu'il soit nécessaire de le vibrer manuellement pour le tasser. On obtient cette caractéristique singulière en ajustant la composition et les caractéristiques rhéologiques du mélange de béton.

L'objectif des études d'optimisation de la formulation des BAP est d'obtenir une formule fiable et solide qui puisse être facilement contrôlée sur le terrain. La formulation a pour objectif de diminuer le seuil de cisaillement du béton tout en maintenant une viscosité adéquate afin d'éviter tout risque de ségrégation.

Étant donné que la formulation de ces bétons repose sur des méthodes très différentes, nous avons opté pour l'approche proposée par l'association française de génie civil AFGC pour notre recherche, dans le but d'obtenir un béton performant et respectueux de l'environnement. Ainsi, le ciment a été en partie remplacé par des quantités différentes (20% ,25% et 30%) de déchets de céramique provenant de la collecte sous forme de poudre.

Les résultats obtenus, qu'ils soient frais ou durcis, étaient analysés afin d'avoir la formule optimale.

Il y a deux parties principales dans ce mémoire.

- ✓ La première partie qui traite une recherche bibliographique sur le béton autoplaçant en deux chapitres ;
- ✓ Une recherche expérimentale qui inclut une description de tous les matériaux employés ainsi que les diverses expériences menées afin d'améliorer la performance d'un béton autoplaçant performant, avec des interprétations des résultats dans la deuxième partie.
- ✓ Notre mémoire se termine par une conclusion générale où nous exposons les résultats les plus significatifs et les plus pertinents obtenus afin de susciter une réflexion tout en recommandant des futurs travaux comme continuité à ce travail.

Chapitre I

Caractéristiques du béton autoplaçant

Chapitre I

Caractéristiques du béton autoplaçant

I.1 Introduction

Le béton autoplaçant (BAP) a été utilisé pour la première fois au Japon à la fin des années 1980 pour améliorer la rentabilité de la construction, en garantissant toujours la mise en place correcte d'un béton de haute qualité sans élimination de vibration. Ces bétons sont actuellement développés en Europe et semblent susceptibles de remplacer à terme le béton vibré traditionnel dans de nombreuses applications. Ils présentent des avantages techniques et économiques : d'une part, il est possible de couler des zones très renforcées ou à géométries complexes et d'obtenir une meilleure qualité de finition (quasiment indépendante de l'expertise des ouvriers), d'autre part, ils réduisent les délais et le coût.

I.2. Définition de BAP

Ces bétons ont une bonne fluidité, sont uniformes et stables et peuvent être installés sans vibrations, ce qui constitue un grand avantage pour la construction de bâtiments. Ils sont très faciles à se déformeter, une fois en place, grâce à leur bonne uniformité, ils peuvent parfaitement épouser la forme des coffrages les plus complexes, offrant ainsi une structure solide et durable [1].

I.3. 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. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.) [2].

Le BAP est adapté 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.
- Des accès difficiles voire impossible pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration [3].

Le BAP est une solution bien adaptée pour [4] :

- Tous types de dalles y compris dalles de compression sur poutrelles hourdis.
 - Radiers.
 - Plancher dalle pleine et plancher chauffant.
 - Rattrapage de niveau en rénovation.
 - Fondations superficielles.
 - Voiles, poteaux, poutres.

I.4. Avantages du béton autoplaçant

Les bétons autoplaçants BAP présentent de nombreux avantages, on cite :

I.4.1. Avantages techniques

- Facilité et rapidité la mise en œuvre du béton.
- Réalisation d'éléments de forme complexe.
- Bétonnage en milieux fortement ferrailés.

I.4.2. Avantages économiques

- Réduction du cout de main d'œuvre et du temps de bétonnage.
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les couts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

I.4.3. 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)[5].

I.5. La spécificité de la composition des BAP

Il existe plusieurs manières de formuler un BAP, légèrement différentes les unes de l'autre tout en conservant ses propriétés (stabilité, liquidité, etc.). Pour ce faire, ajoutez des agents collants, augmentez les ajouts de minéraux et choisissez la bonne teneur en sable et en granulats[6].

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

I.5.1. Un volume de pâte élevé

Étant donné que le béton est un mélange de pâte et de granulats, la quantité de pâte nécessaire pour combler les espaces entre les granulats est minime. La quantité supplémentaire de pâte entraîne une certaine dispersion des agrégats, limitant ainsi les frottements interarticulaires et conférant de la fluidité au matériau. Le rôle du coulis (ciment + additifs + eau disponible + air clos) et l'élimination des granulats, donc son volume en BAP est plus élevé[7].

I.5.2. Une quantité de fines élevée

Les compositions d'un BAP contiennent de grandes quantités de poudres fines (jusqu'à environ 500 kg/m³, moins de 80 µm de diamètre) pour garantir la transformabilité et limiter le risque de ressuage et de ségrégation. L'introduction d'additifs minéraux entraîne des modifications de la porosité de la matrice cimentaire et affecte les propriétés mécaniques du béton.

I.5.3. L'utilisation de superplastifiants

Pour améliorer la fluidité d'un BAP, il est essentiel d'utiliser un superplastifiant. Ce produit accroît la capacité d'ouverture du béton tout en réduisant sa viscosité. Par conséquent, le matériau perd sa stabilité en termes de ségrégation et de ressuage.

I.5.4. Un faible volume de gravillons

Pour la formulation des BAP, il est envisageable d'utiliser des granulats concassés ou roulés ayant un diamètre maximal compris entre 10 et 20 mm. Cependant, étant donné que les gravillons sont responsables du blocage du béton en zone confinée, il est nécessaire de restreindre son volume. Le rapport massique gravier/sable (G/S) est proche de 1 pour les BAP

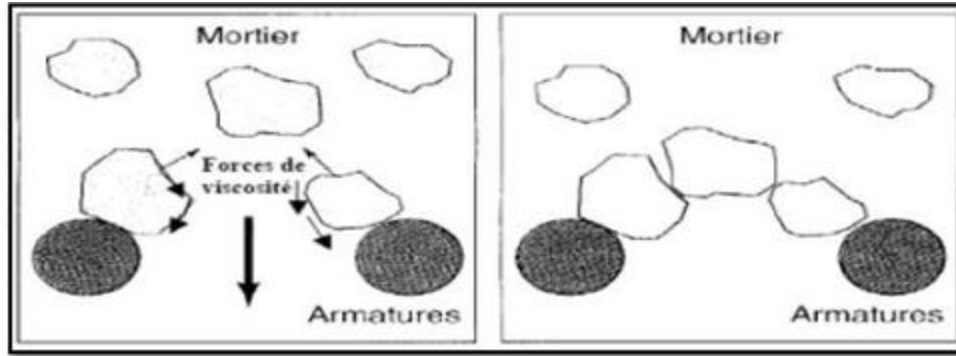


Figure I.1. Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [8].

I.5.5. Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité)

Il s'agit de dérivés celluloses, de polysaccharides ou de suspensions colloïdales qui augmentent la viscosité de l'eau, avec pour objectif d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse [9].

Ces adjuvants semblent être bénéfiques pour des bétons à rapport eau/liant élevé, mais leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP à rapport eau/liant faible [10].

I.6. 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.

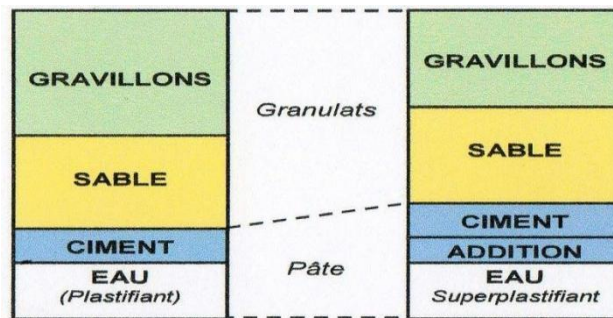


Figure I.1. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.

I.6.1. Le ciment

Le ciment occupe une place prépondérante dans les BAP. Il entre en réaction chimique avec l'eau afin de créer une pâte qui rassemble les granulats et apporte la résistance mécanique au béton[11].

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

- CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).
- CEM III : Ciment de haut-fourneau (CHF).
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).
- CEM V : Ciment composé (CLC).

I.6.2. Les granulats

Les granulats utilisés dans les bétons autoplaçants (BAP) peuvent prendre différentes formes, mais en général, les granulats anguleux sont préférés aux granulats ronds. Voici deux types fréquemment employés :

Les granulats concassés se distinguent par leurs arêtes vives et leur forme angulaire. Ils sont fabriqués à partir de roches naturelles ou de débris de bâtiment. La bonne adhérence entre les particules est assurée par les granulats concassés, ce qui améliore la cohésion du BAP.

Les granulats roulés se distinguent par leur forme plus arrondie et lisse. En général, ils sont fabriqués à partir de graviers naturels fabriqués par l'érosion des cours d'eau. Dans les BAP, il est possible d'utiliser des granulats roulés, mais ils peuvent être moins recommandés car leur forme ronde peut diminuer la friction.

I.6.3. Les ajouts minéraux

Les BAP peuvent inclure des minéraux tels que des cendres volantes, du laitier de haut fourneau, des pouzzolanes naturelles, de la fumée de silice, des matériaux recyclés ou des fillers, qui sont des matériaux fins ajoutés au ciment afin d'améliorer certaines caractéristiques du béton, telles que sa durabilité et sa résistance aux agressions chimiques[12].

On va examiner uniquement l'ajout sujet dans cette recherche :

I.6.3.1. La poudre de céramique

L'ajout minéral de la poudre de céramique est fréquemment employé dans la fabrication des bétons autoplaçants (BAP). Elle sert à remplacer partiellement le ciment ou à être ajoutée pour améliorer certaines caractéristiques du BAP. Les sources de poudre de céramique peuvent être diverses, comme les déchets de fabrication de céramique ou les déchets de carreaux cassés[13].

Son inclusion dans les BAP peut apporter les avantages suivants :

1. Amélioration de la durabilité : La poudre de céramique peut contribuer à améliorer la durabilité du BAP en réduisant la perméabilité et en augmentant la résistance aux agressions chimiques, telles que les attaques acides ou les sels de déneigement.
2. Contrôle de la chaleur d'hydratation : La poudre de céramique peut aider à réguler la libération de chaleur pendant la phase d'hydratation du ciment, ce qui est particulièrement bénéfique dans les grandes structures en béton pour prévenir les problèmes liés à la thermo réactivité

I.6.4. L'eau de gâchage

Il est important de bien doser l'eau de gâchage afin d'obtenir un mélange homogène et une hydratation optimale du ciment. L'eau de gâchage présente divers aspects tels que sa quantité, sa qualité, son rapport eau/ciment et ses conséquences sur les caractéristiques du béton.

I.6.5. Les adjuvants

Les adjuvants sont des substances ajoutées au mélange du béton pour améliorer ou modifier certaines de ses propriétés[14].

I.6.5.1. Les superplastifiants

Les superplastifiants (HRWR, High Range Water Reducers) sont des agents réducteurs d'eau à haute efficacité qui permettent de diminuer la quantité d'eau requise pour produire un béton plastique tout en préservant 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[15].

I.6.5.1.1. L'emploi de superplastifiants

En réduisant les frottements entre les grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau, les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons extrêmement fluides [16].

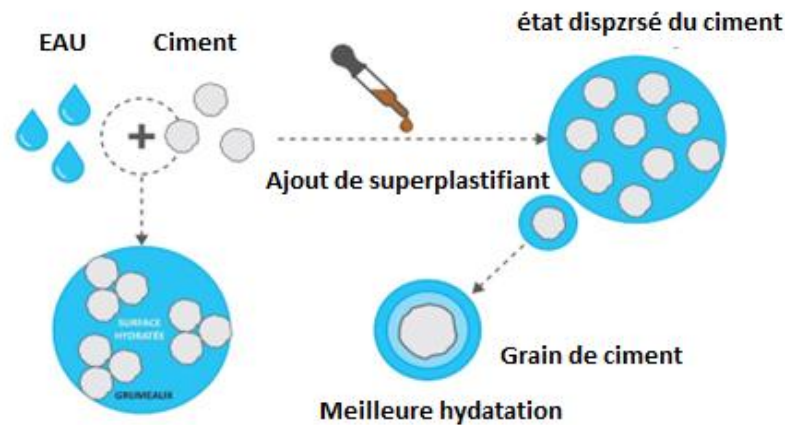


Figure I.2. Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment [16]

I.7. Les agents de viscosité

L'incorporation d'un super plastifiant dans un béton accroît sa capacité à être ouvré, mais a tendance à diminuer sa viscosité, ce qui rend le matériau moins stable en termes de ségrégation et de ressuage. Afin de réduire cet effet, il est essentiel d'ajouter un agent de viscosité[17].

La ségrégation et le ressuage du béton sont réduits grâce à un dosage élevé de super plastifiant

I.8. Propriétés des BAP

I.8.1. À l'état frais

- Grande fluidité : Le BAP possède une capacité d'écoulement remarquable et peut être installé sans nécessiter de vibrations externes. Il a la capacité de remplir aisément les coffrages complexes et d'atteindre les zones difficiles à accéder[18].
- La ségrégation n'existe pas : Les matériaux essentiels du BAP, comme les agrégats et le ciment, restent bien répartis dans le mélange, ce qui empêche la séparation des composants lors de l'écoulement[18].
- Faible résistance à l'écoulement : Le BAP offre une résistance à l'écoulement faible, ce qui diminue la friction entre les particules. Cela favorise une circulation plus fluide et une capacité de remplissage accrue des espaces.
- Le BAP possède une capacité de remplissage et de passage à travers les armatures, ce qui lui permet de circuler facilement autour des armatures et de traverser les zones densément armées sans créer de blocage[18].

I.8.2. À l'état durci

- Le BAP présente une résistance mécanique similaire à celle des bétons classiques, ce qui lui permet d'être employé dans diverses applications structurelles[19].
- La durabilité du BAP peut varier en fonction de la composition du mélange et des adjuvants utilisés, ce qui peut entraîner une résistance accrue à la carbonatation, à la pénétration d'eau et aux attaques chimiques[19].

I.9. Différentes approches de formulation des BAPs

Puisque les techniques de formulation classiques ne prennent pas en considération les adjuvants et les additions, qui constituent pourtant des éléments indispensables des bétons autoplaçants (BAP), de nombreuses méthodes de formulation ont été élaborées à l'échelle mondiale. La majorité de ces techniques de formulation se basent essentiellement sur des expériences menées sur des BAP.

Certaines de ces méthodes comprennent :

I.9.1. Approche empirique

Cette approche consiste à se baser sur des formulations existantes de BAP qui ont donné de bons résultats dans des projets similaires. Elle repose sur l'expérience accumulée et les connaissances pratiques pour sélectionner les matériaux et les proportions appropriées.

I.9.2. Approche de la méthode des boîtes

Cette approche implique la division des matériaux constitutifs du BAP (ciment, agrégats, adjuvants) en différentes "boîtes" pour déterminer les proportions relatives. Par exemple, la méthode des boîtes de Powers peut être utilisée pour obtenir des proportions initiales approximatives, qui sont ensuite ajustées en fonction des caractéristiques recherchées.

I.9.3. Approche de la méthode des pâtes

Cette approche se concentre sur les propriétés des pâtes de ciment, qui constituent la matrice du BAP. Les proportions des matériaux sont déterminées en tenant compte des rapports eau/ciment et des caractéristiques des adjuvants pour obtenir la viscosité et la fluidité souhaitées.

I.9.4. Approche basée sur des modèles de comportement rhéologique

Cette approche utilise des modèles mathématiques et des simulations pour prédire le comportement rhéologique du BAP en fonction des propriétés des matériaux et des proportions. Elle permet d'optimiser les dosages en fonction des caractéristiques spécifiques recherchées. L'AFGC (Association Française de Génie Civil) propose les dosages suivants comme recommandation

- Un rapport gravier/sable (G/S) proche de 1.
- Un rapport eau/ciment (E/C) proche de 0.5.
- Un dosage en ciment supérieur ou égal à 300 kg/m³.
- $330 \text{ (l/m}^3\text{)} \leq \text{volume de pâte} \leq 400 \text{ (l/m}^3\text{)}$.
- $120 \text{ (kg/m}^3\text{)} \leq \text{masse d'addition} \leq 200 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ [20].

I.10. Conclusion

Les matériaux innovants tels que les bétons autoplaçants se caractérisent par leur fluidité remarquable, leur résistance à la ségrégation et leur capacité de remplissage élevée. Grâce à leur formulation particulière, qui inclut des adjuvants et des additions, ils peuvent être facilement installés sans avoir recours à une vibration intensive. De cette manière, ils présentent des bénéfices en matière de productivité, de qualité des parements et de simplicité de mise en place. Cependant, pour les formuler et les caractériser, il est essentiel d'adopter une approche particulière et d'avoir une connaissance approfondie. Les recherches et les développements sur les bétons autoplaçants continuent d'être menés afin d'améliorer leurs performances. Leur popularité grandissante dans le domaine de la construction démontre leur pertinence et leur capacité à satisfaire les exigences actuelles en matière de durabilité et de qualité des constructions.

CHAPITRE II
État de l`art sur le béton
autoplaçant

CHAPITRE II

État de l'art sur le béton autoplaçant

II.1. Introduction

Le béton autoplaçant avec de la poudre de céramique est un domaine de recherche intéressant dans le domaine de la construction. Ce type de béton combine les avantages du béton autoplaçant, qui peut être coulé facilement sans besoin de vibration, avec les propriétés améliorées apportées par l'addition de poudre de céramique.

II.2. La rhéologie d'un BAP

La rhéologie est l'étude du comportement mécanique d'un matériau face à l'écoulement et aux déformations sous l'effet des contraintes au fil du temps. En d'autres mots, la mesure consiste à comparer un matériau à des modèles afin de décrire un comportement et de prédire le niveau de déformation pour une contrainte spécifique [21].

II.2.1. Le comportement rhéologique d'un BAP

La réponse mécanique d'un BAP est exprimée par son comportement rhéologique, c'est-à-dire la corrélation entre les déformations du BAP et les contraintes appliquées. Elle se manifeste en général par une équation constitutive entre le tenseur des contraintes et le tenseur des taux de déformation. Les comportements rhéologiques sont très divers, allant d'une relation linéaire entre contraintes et taux de déformation à des comportements complexes, qui peuvent varier en fonction des vitesses de déformation, de l'histoire du BAP ou des conditions d'écoulement[22].

II.2.2. Les grandeurs de rhéologie

En général, les bétons ont un comportement viscoplastique de type Bingham. La loi de comportement des BAP peut être exprimée de la manière suivante :

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

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

II.2.2.1. Contrainte de cisaillement τ (Pa)

Dans des conditions laminaires, lors d'un mouvement de cisaillement, les différentes couches sont en mouvement relatif les unes par rapport aux autres. L'effet de ce mouvement relatif est la formation de contraintes tangentielles τ , qui sont parallèlement à la surface de chaque couche[23].

II.2.2.2. Vitesse de cisaillement γ' (s-1)

Prenons l'hypothèse d'un matériau constitué de couches moléculaires parallèles, prisonnières entre deux plans de surface séparés par h . Le premier est immobile, le second se déplace d'une distance dx à une vitesse constante de magnitude V_0 . La première couche moléculaire se déplace à la même vitesse suite à une force tangentielle. Dans la même direction, les couches inférieures se déplaceront, mais à des vitesses de plus en plus faibles. Cela génère une différence de vitesse entre les deux plans, où les vitesses diminuent progressivement à mesure que l'on s'éloigne du plan en mouvement[24].

II.2.2.3. Viscosité dynamique μ (Pa.s)

La viscosité d'un système désigne sa capacité à résister à l'écoulement lorsque soumis à une contrainte tangentielle. Le coefficient de viscosité est quantifié par la relation suivante :

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

Le coefficient de viscosité est une propriété physique fondamentale qui joue un rôle crucial dans l'étude de la rhéologie des fluides. Dans certains cas, sa connaissance peut suffire à caractériser le comportement rhéologique d'un matériau.

II.2.2.4. Seuil de cisaillement τ_0

La contrainte de cisaillement minimale nécessaire pour qu'un fluide commence à s'écouler lorsqu'il est soumis à une déformation de cisaillement est appelée seuil de cisaillement. À cette valeur inférieure, le fluide a un comportement semblable à celui d'un solide, sans déformations permanentes[24].

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

L'analyse des bétons autoplaçants (BAP) à l'état frais implique diverses expériences pour évaluer leurs caractéristiques et leurs comportements. Quelques-uns des principaux tests de caractérisation effectués sur les BAP à l'état frais sont présentés.

II.3.1. Essai d'étalement

Est employé afin de tester la fluidité et la capacité d'auto-étalement d'un béton autoplaçant (BAP) à l'état frais. Pendant l'essai, on verse un cône tronqué rempli de BAP sur une plaque plane, puis on le retire. L'écart d'étalement ou écart de slump est une mesure de la distance horizontale parcourue par l'étalement du BAP afin d'évaluer sa consistance. En général, on recommande un écart d'étalement moyen de 600 à 750 mm pour un béton autoplaçant (BAP)

II.3.2. Essai de boîte en L

L'essai de boîte en L consiste à utiliser une boîte en forme de L, qui est divisée en deux parties : une section verticale et une section horizontale. On verse le BAP dans la section verticale, puis on ouvre la section horizontale afin que la pâte de béton puisse s'écouler dans cette direction. Ensuite, la boîte est inclinée vers le haut afin d'évaluer la distance parcourue par le BAP dans la partie horizontale. La mesure de cette distance, connue sous le nom d'écart d'écoulement en L, évalue la capacité du BAP à remplir et à se déplacer dans des zones complexes. Cet essai offre la possibilité de reproduire le comportement du BAP lorsqu'il est appliqué dans des zones étroites ou avec des obstacles, comme des coffrages complexes. Un rapport supérieur ou égal à 0,8 signale une bonne situation[25].

II.3.3. Essai de stabilité au tamis

La capacité du BAP à maintenir sa cohésion et à prévenir la ségrégation des matériaux lors de contraintes, comme lors de vibrations, est évaluée dans cet essai. L'expérience implique de déposer une quantité spécifique de béton (5 kg) sur un tamis avec une maille de 5 mm, puis de laisser le béton tomber d'une hauteur de 50 cm. La stabilité du béton est mesurée par le pourcentage de laitance qui traverse le tamis par rapport au poids initial de l'échantillon. Il faut que ce rapport soit compris entre 10 % et 20 %.

II.3.4. Le rhéomètre

L'essai de rhéomètre, aussi connu sous le nom d'essai de viscosité ou d'essai de comportement rhéologique, est une méthode de mesure des propriétés de fluage et de déformation d'un béton autoplaçant (BAP) à l'état frais. Il utilise un appareil appelé rhéomètre, qui est équipé d'une géométrie de mesure spécifique, généralement un cône et une plaque. Les mesures sont réalisées pour évaluer le comportement du BAP lorsqu'il est soumis à des contraintes de cisaillement. Cet essai permet de caractériser les caractéristiques rhéologiques du BAP, comme sa viscosité dynamique, son seuil de cisaillement, sa résistance au fluage et sa capacité d'écoulement. Il est crucial de connaître ces informations afin de saisir le comportement du BAP lors du coulage, du remplissage des coffrages et de leur utilisation[26].

II.4. Caractérisation des BAP à l'état durci

II.4.1 Les essais destructifs

II.4.1.1. 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. La charge maximale atteinte, connue sous le nom de P (KN), est enregistrée, ainsi que la surface de chargement S (m²). On peut ainsi calculer la contrainte maximale en divisant la charge maximale par la surface de chargement

II.4.1.2. La résistance à la traction par 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.

II.4.2. Les essais non destructifs

II.4.2.1. Essai de scléromètre

L'utilisation de l'essai de scléromètre est une technique rapide et non destructive qui permet d'évaluer la résistance du béton en se basant sur sa dureté superficielle.

L'indice de rebondissement d'un impacteur en acier projeté sur la surface du béton est mesuré dans cet essai[27].

II.4.2.2. Essai d'auscultation sonore

L'auscultation sonore, une technique non destructive, est employée afin d'évaluer l'intégrité et la qualité du béton en utilisant des ondes sonores. Ce test permet de repérer les imperfections internes du béton comme les cavités, les fissures ou les zones endommagées[28].

II.5. État de l'art sur béton autoplaçant

L'état de l'art sur les bétons autoplaçants (BAP) englobe une vaste gamme de sujets de recherche, de développement et d'applications. Voici un aperçu des principaux aspects couverts par l'état de l'art [29] :

II.5.1. Formulation et composition des mélanges

Les recherches portent sur la conception de mélanges de béton autoplaçant équilibrés, incluant la sélection des matériaux constitutifs tels que les agrégats, les adjuvants superplastifiants, les fillers, ainsi que l'optimisation des proportions pour obtenir des performances spécifiques en termes de rhéologie, de résistance et de durabilité.

II.5.2. Rhéologie et comportement frais

L'étude de la rhéologie est essentielle pour comprendre le comportement frais du BAP, y compris sa capacité à s'auto-niveler, à remplir les moules et à éviter la ségrégation. Des modèles mathématiques et des essais expérimentaux sont utilisés pour évaluer et prédire la capacité d'auto-compactage du mélange.

II.5.3. Propriétés mécaniques et durabilité

Les recherches portent sur l'évaluation des propriétés mécaniques du BAP à différentes échelles, de la résistance à la compression à la résistance à la traction, ainsi que sur sa durabilité face à des facteurs environnementaux tels que la carbonatation, la corrosion des armatures et la réaction alcali-silice.

II.5.4. Incorporation de matériaux durables

L'utilisation de matériaux alternatifs, tels que les fillers minéraux, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et les nanomatériaux, est explorée pour améliorer les performances du BAP tout en réduisant son impact environnemental.

II.5.5. Applications et techniques de mise en œuvre

L'état de l'art examine les diverses applications des BAP dans la construction, y compris les structures de génie civil, les éléments architecturaux, les revêtements de sols, ainsi que les techniques de mise en œuvre telles que le coulage en place, le préfabriqué et l'impression 3D.

II.5.6. Normalisation et réglementation

Des efforts sont déployés pour développer des normes et des lignes directrices nationales et internationales pour le BAP, afin d'assurer sa qualité et sa compatibilité avec les pratiques de construction existantes[30].

II.6. Analyse de l'influence des additions minérales sur le béton autoplaçant

L'influence des additions minérales sur le béton autoplaçant (BAP) est un sujet de recherche important dans le domaine de la construction. Voici une analyse des principaux aspects de cette influence [31] :

II.6.1. Amélioration de la rhéologie

Les additions minérales telles que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et la fumée de silice peuvent modifier la rhéologie du BAP. Elles peuvent améliorer la stabilité et la viscosité du mélange, ce qui facilite le maintien de la capacité d'auto-compactage tout en réduisant la ségrégation.

II.6.2. Optimisation de la granulométrie des particules

Les additions minérales peuvent influencer la distribution granulométrique du mélange, ce qui peut avoir un impact sur la compacité et la résistance du BAP. Par exemple, des particules fines peuvent remplir les vides entre les particules plus grosses, améliorant ainsi la compacité du mélange.

II.6.3. Amélioration des propriétés mécaniques

L'incorporation d'additions minérales peut contribuer à améliorer les propriétés mécaniques du BAP, telles que la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance à la traction. Cela peut être dû à la réactivité des particules minérales et à leur capacité à former des liaisons plus fortes avec la matrice de ciment.

II.6.4. Réduction de la chaleur d'hydratation

Certaines additions minérales, comme les cendres volantes, peuvent agir comme des agents de réduction de la chaleur d'hydratation, ce qui peut être bénéfique pour le BAP dans les applications où le contrôle de la température est crucial, comme dans les grands ouvrages en béton.

II.6.5. Amélioration de la durabilité

Les additions minérales peuvent également contribuer à améliorer la durabilité du BAP en réduisant la perméabilité, en augmentant la résistance à la carbonatation et en réduisant la réactivité alcali-silice, ce qui peut prolonger la durée de vie utile de la structure en béton.[32]

II.7. Travaux de recherche sur les bétons autoplaçants

Voici quelques travaux de recherche significatifs sur les bétons autoplaçants :

1. "Development of self-compacting concrete", Okamura and Ouchi (2003) - Cette publication est souvent considérée comme le point de départ de la recherche sur les bétons autoplaçants. Les auteurs ont introduit le concept de béton autoplaçant et ont présenté les principes de base de sa formulation et de son comportement.
2. "Self-Compacting Concrete", Felekoğlu (2011) - Cette thèse examine les propriétés et le comportement des bétons autoplaçants, ainsi que les méthodes de conception des mélanges et les applications pratiques.
3. "Effect of mix constituents on rheology of self-compacting concrete", Subramaniam et al. (2007) - Cette étude explore l'effet des différents composants du mélange sur la rhéologie du béton autoplaçant, en mettant particulièrement l'accent sur la granulométrie et la nature des agrégats.
4. "Fresh properties of self-consolidating concrete containing high-volume supplementary cementitious materials", Khayat and Guizani (2013) - Ce travail examine

l'impact de l'ajout de matériaux cimentaires supplémentaires sur les propriétés fraîches des bétons autoplaçants.

5. "Durability properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of flyash", de Larrard et al. (2002) - Cette étude évalue les propriétés de durabilité des bétons autoplaçants contenant des volumes élevés de cendres volantes, en mettant l'accent sur la résistance à la carbonatation et à la corrosion des armatures[33].

II.8. Conclusion

Ces travaux de recherche fournissent une base solide pour la compréhension et le développement continu des bétons autoplaçants, couvrant un large éventail de sujets, des propriétés fraîches à la durabilité, en passant par la conception des mélanges et l'utilisation de différents matériaux cimentaires.

Chapitre III

Identification des matériaux utilisés et formulation

Chapitre III

Identification des matériaux utilisés et formulation

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différentes caractéristiques des matériaux locaux utilisés dans l'industrie du béton. Tous les essais ont été effectués au laboratoire de génie civil de l'université de Bordj Bou Arreridj.

III.2. Présentation des matériaux utilisés

- Un sable de dune provenant d'OuedSouf ;
- Deux fractions de gravier concassé (3/8,8/16) de la carrière Mechri, BBA ;
- CimentCPJ42.5provenantdelacimenterie Lafarge de Hammam Dalaa, M'sila ;
- SuperplastifiantdeMEDAFLOWSP30deGranitex ;
- Déchets de céramique sous forme de poudre ;
- L'eau de gâchage :eau de la oratoire de génie civil université BAA.

III.3. Caractéristiques des matériaux utilisés

III.3.1. Sable

III.3.1.1. Essai d'analyse granulométrique : [NFENP18-650]

L'analyse granulométrique est une méthode utilisée pour mesurer et caractériser les particules en termes de taille, de forme, de surface, de porosité et d'autres caractéristiques physiques. Elle permet d'identifier les types de matériaux ou de particules présents dans un échantillon et d'évaluer la manière dont ils interagissent les uns avec les autres. L'analyse de la taille des particules aide à comprendre l'impact sur la filtration et le mélange de différentes particules et ce en calculant 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

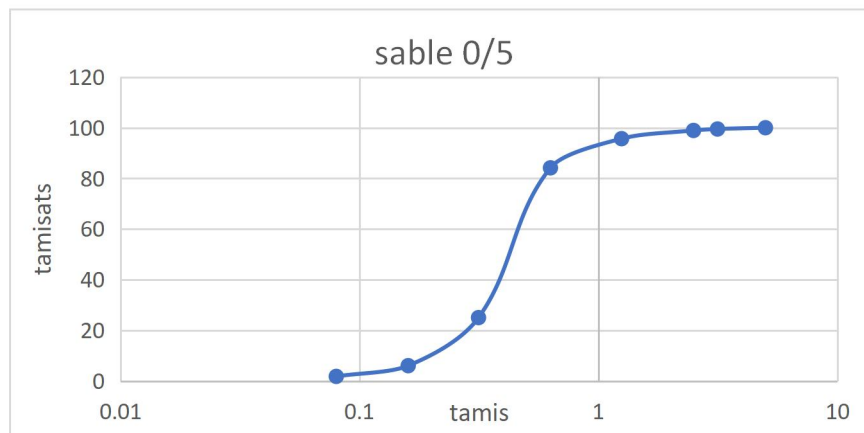


Figure III.1. Courbe granulométrique du sable Oued Souf

➤ **Module de finesse : [NFEN P18-304]**

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:

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

Où Rc est le refus cumulé.

Les normes soviétiques spécifient le module de finesse M_f 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	$2 < \mu < 2.5$
Sable fin	$1.5 < \mu < 2$
Sable très fin	$1 < \mu < 1.5$

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

$$M_f = \frac{0,43 + 4,68 + 17,29 + 63,12 + 93,08}{100} = 1,79$$

- 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.

III.3 Tableau: 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 $E = \frac{P}{C}$
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 dans 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. L'analyse granulométrique du gravier 3/8 et 8/16

Tamis (mm)	Refus partiel		Refus cumulé				Tamisât	
	(g)		(g)		(%)		(%)	
	3/8	8/16	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

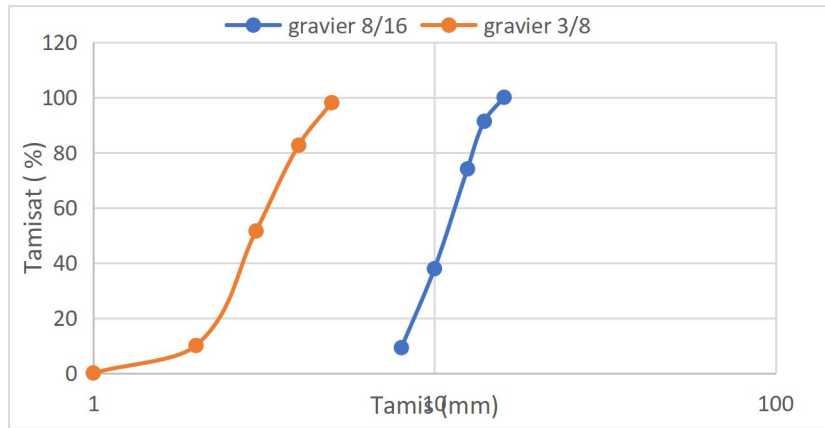


Figure. III.2. Courbes granulométriques du gravier 8/16 et 3/8

III.3.2.2. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés

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

Les résultats sont regroupés dans le **tableau 5.III**.

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 $P = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}$ (%)	Compacité $C = 1 - P$ (%)	Indice de vides $E = \frac{P}{C}$
Gravier3/8	2.6	1.34	48.46	51.54	0.94
Gravier8/16	2.67	1.44	46.06	53.94	0.85

III.3.2.3 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 L_A

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

Le gravier (8/16) est un gravier **Très dures** 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)

Selon sa fiche technique, la composition chimique et minéralogique est illustrée au tableau III.7 :

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

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

Toutes les caractéristiques physicomécaniques sont regroupées dans le tableau ci après :

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. Poudre de céramique

La poudre utilisée dans notre étude est spécifiquement issue des déchets récupérés auprès de SARL EL NOURASICORPORATION située à Oued Athmenia, Mila, Algérie, lors du polissage des faïences produites. Elle est composée d'un mélange de différents gisements locaux, notamment Annaba, Alger, BBA (Medjana) et Jijel (El-Milia). Après avoir broyé ces déchets en poudre, nous l'avons tamisée à travers un tamis de 0,08 mm afin d'assurer sa finesse, ce qui entraîne une distribution granulométrique élevée (SSB) et une densité absolue qui vaut **2,5**.

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.9. 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%

Le dosage choisi est celui de saturation, déterminé à partir de l'essai au mini cône qui consiste à remplir le petit cône de pâte de liant, 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 est de 2 % de la masse du liant (ciment).

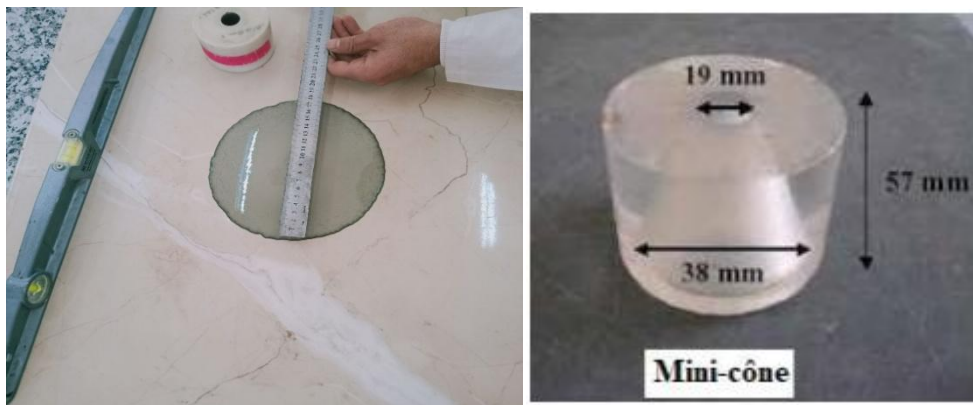


Figure III.3. Détermination du point de saturation au mini cône (laboratoire de GC)

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 de béton auto plaçant par la méthode AFGC

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

III.4.1. Choix des constituants pour formuler notre BAP

Notre étude s'appuie sur la variation du rapport G/S et l'incorporation de la poudre de céramique en substitution de la masse du ciment à différents pourcentages. Le reste des constituants est fixé.

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 $400 \text{ Kg} / \text{m}^3$.

Le rapport eau/liant (E/L) = 0,38

Le dosage en superplastifiant SP est de 2% de la masse de liant.

On fait remplacer par la suite à chaque fois le même volume de ciment retranché par un pourcentage de poudre de céramique. 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 un mètre cube (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%×L d'où SP =2%×400 =8 Kg

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

Esp=70%* 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 = 146.4ℓ**

Détermination du volume des granulats Vgranulats :

Sachant que le volume total unitaire est : **Vtotal**=Vpâte +Vgranulats +Vair ;

Avec : **Vtotal** = 1m³ = 1000 ℓ et le volume des vides représente 2,5% du volume total, donc

Vair=25ℓ.

Le Volume de pâte V pâte est la somme de :

$$\mathbf{Vp\hat{a}te} = \frac{M_{ciment}}{\rho_c} + \frac{M_{super\ palastifiant}}{\rho_{sp}} + \frac{M_{eau}}{\rho_e},$$

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

$$\text{On aura : } \mathbf{Vp\hat{a}te} = \frac{400}{3.1} + \frac{146.4}{1} + \frac{8}{1.07}$$

Donc le volume des granulats sera : **Vgranulats** = Vtotal – (V pâte + Vair)

$$\mathbf{Vgraulats} = 1000 - (282.91 + 25) \text{ d'où } \mathbf{Vgranulats} = 692.09 \text{ ℓ}$$

Cette valeur représente la somme des volumes des graviers Vgr et sable Vs

Le dosage en masse du Sable : on sait que G/S = 0,9 et que **Vgranulats** = Vs + Vgr, on aura :

$$\mathbf{Vgr} = Vs + 0,9 \times Vs \rightarrow Vs = \frac{692.09}{1.9} = 364.26 \text{ ℓ, c'est le volume de Sable avec } \rho_s = 2,6 \text{Kg/ ℓ ainsi}$$

sa masse est : **Msable = 947.08Kg**

Le dosage en masse des graviers : on a le volume des graviers V_{gr} égal à $0,9 \times V_s$

Alors : $V_{gr} = 327.83 \ell$

- $V_{gr} (3/8) = V_g \times 40\% = 327.83 \times 40\%$ qui vaut 131.13ℓ , avec $\rho_s = 2,6 \text{ Kg}/\ell$ alors **$M = 340.94 \text{ Kg}$** ;
- $V_{gr} (8/16) = V_g \times 60\% = 327.83 \times 60\%$ qui vaut 196.70ℓ avec $\rho_s = 2,67 \text{ Kg}/\text{m}^3$ alors **$M = 525.19 \text{ Kg}$** .

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 36ℓ de béton, quantité nécessaire pour la confection des éprouvettes.

Tableau III.10. Formulation des BAP de rapport $G/S=0.9$ et $G/S=1$

Constituants	Quantité des BAP en Kg								
	BAP (0% PC)		BAP (20% PC)		BAP (25% PC)		BAP (30% PC)		
	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	
Eau	146.4	5.28	146.4	5.28	146.4	5.28	146.4	5.28	
SP	8	0,29	8	0,29	8	0,29	8	0,29	
Céramique	0	0	64.53	2.32	80.65	2.9	96.78	3.48	
Gravier 3/8	340.94	12.27	340.94	12.27	340.94	12.27	340.94	12.27	G/S= 0.9
Gravier 8/16	525.19	18.9	525.19	18.9	525.19	18.9	525.19	18.9	
Sable	947.08	34.1	947.08	34.1	947.08	34.1	947.08	34.1	
Gravier 3/8	359.89	12.95	359.89	12.95	359.89	12.95	359.89	12.95	G/S= 1
Gravier 8/16	554.37	19.95	554.37	19.95	554.37	19.95	554.37	19.95	
Sable	899.73	32.39	899.73	32.39	899.73	32.39	899.73	32.39	

III.5. Procédures de fabrication des BAP

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, la poudre de céramique). 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. L'essai est présenté dans la figure suivante :



Figure. III.4. L'essai d'étalement (laboratoire de génie civil)

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.

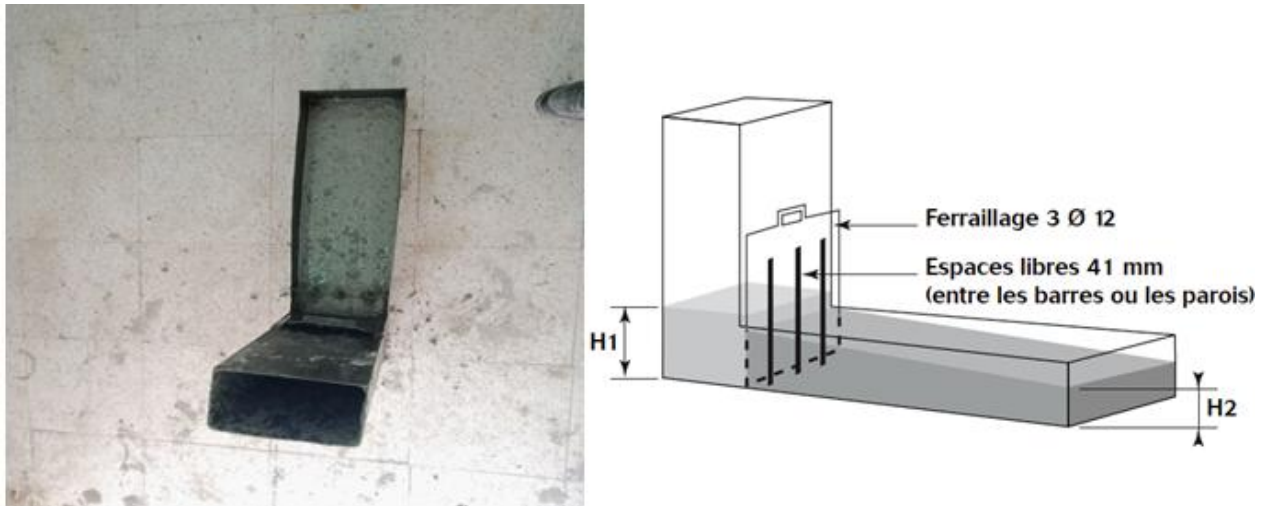


Figure III.5. L'essai de la boîte en L (laboratoire de GC)

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.



Figure III.6. L'essai Stabilité au tamis (laboratoire de GC)

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.



Figure III.7. Essai rhéomètre (laboratoire de GC)

III.7. Confection des éprouvettes

III.7.1. 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 (10x10x10 cm).
- Cylindrique (16x32cm).

III.7.2. 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 20c.

III.8. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci

III.8.1. Les essais destructifs

III.8.1.1. 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**.



Figure III.8. L'essai de compression (laboratoire de GC)

III.8.1.2. 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.

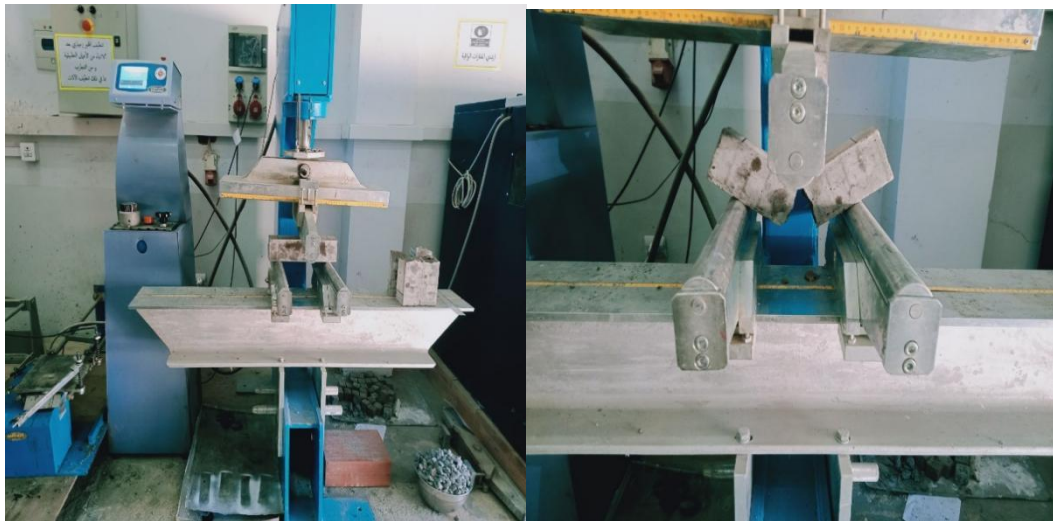


Figure III.9. L'essai de traction par flexion (laboratoire de GC)

III.8.2. Les essais non destructifs

III.8.2.1. Ultrason [NA EN 12504-4]

Cette méthode permet de mesurer le temps de propagation de l'onde sonore traversant le béton et après on a calculé la vitesse. Plus la vitesse est grande plus le béton est bien résistant.

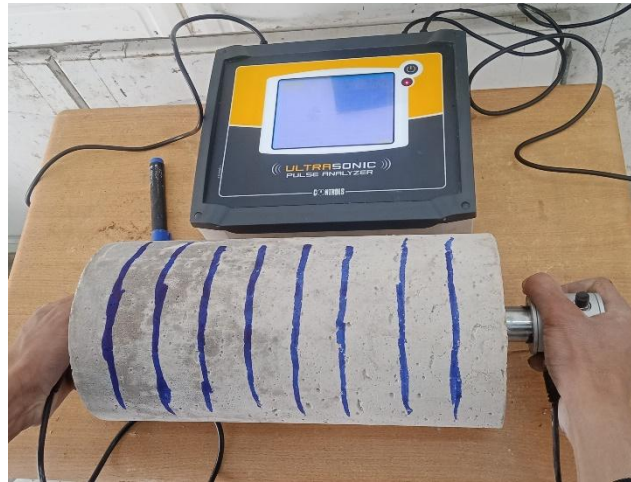


Figure III.10. L'essai d'ultrason (la boratoire de GC)

III.8.2.2. Essai de scléromètre [NA EN 12504-2]

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



Figure. III.12. L'essai descléromètre(laboratoire de GC)

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différents essais et caractéristiques des matériaux utilisés (gravier, sable, ciment, poudre de céramique et le superplastifiant). Pour la préparation du béton autoplaçant avec une formulation de deux rapport ($G/S=0.9$) et ($G/S= 1$) à base de poudre de céramique (20%,25% et 30%).

Chapitre IV

Résultats et Analyse

Chapitre IV

Résultats et Analyse

IV.1. Introduction

Le comportement du béton, lorsqu'il est frais, a des répercussions pratiques sur son comportement une fois durci dans les structures. Il est donc essentiel de contrôler les caractéristiques du béton en ce qui concerne son écoulement autoplaçant à l'état frais, car cela constitue une condition préalable pour garantir une application correcte de ce matériau. Dans ce qui suit, on va faire valider les tests et essais pertinents de caractérisation des propriétés des BAP et d'analyser la sensibilité des formulations.

IV.2. Résultats des essais à l'état frais

Les résultats des essais à l'état frais se concentrent sur les caractéristiques principales telles que la fluidité, la viscosité, le risque de blocage et la ségrégation.

IV.2.1 Résultats des essais de caractérisation des BAP

La caractérisation du béton à l'état frais s'est limitée aux tests recommandés par l'AFGC, à savoir l'étalement au cône, l'écoulement à la boîte en L et la stabilité au tamis. Les résultats obtenus sont exposés au tableau IV.1 et ensuite illustrés par des histogrammes dans les figures IV.1 à IV.4.

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	2,36
BAP 0,9-20	71	3.92	83	2,29
BAP 1-20	68	2.38	81	2,34
BAP 0,9-25	71.5	5.42	88	2.29
BAP 1-25	73	6,48	86	2,37
BAP 0,9-30	69	2.22	89	2.35
BAP 1-30	66	1.30	85	2.30

Clarification :

Les indices des BAP présentés dans le tableau IV.1 et dans tout ce qui suit, 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 poudres de céramique.

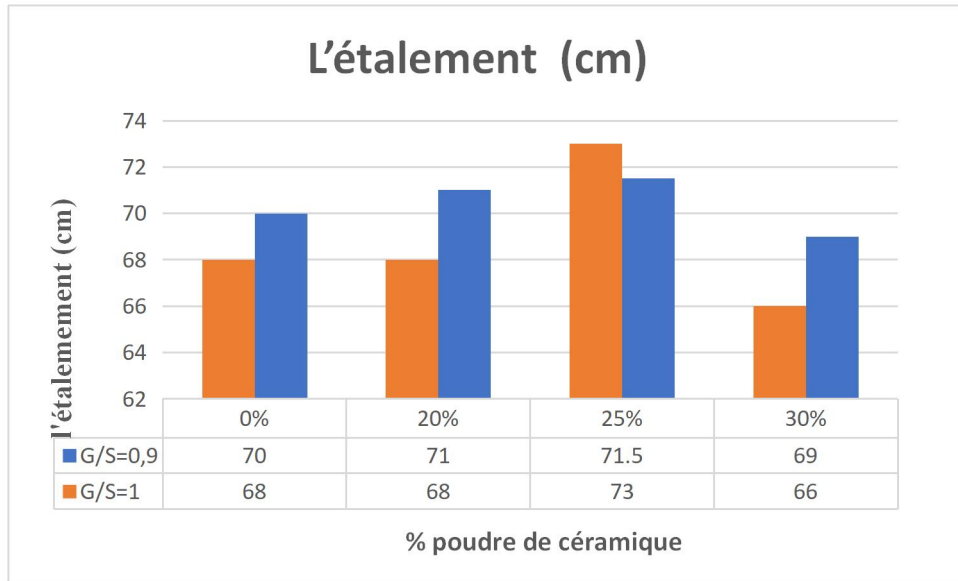


Figure IV.1. Résultats de l'essai de l'étalement

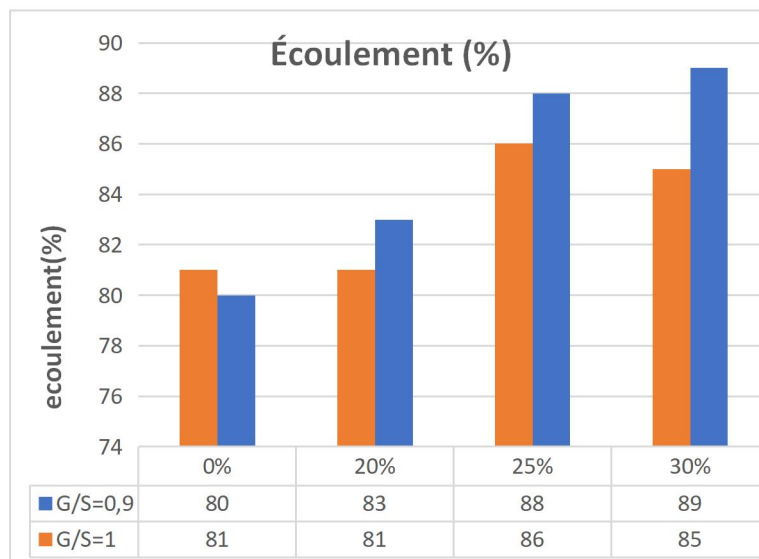


Figure IV.2. Résultats de l'essai de l'écoulement

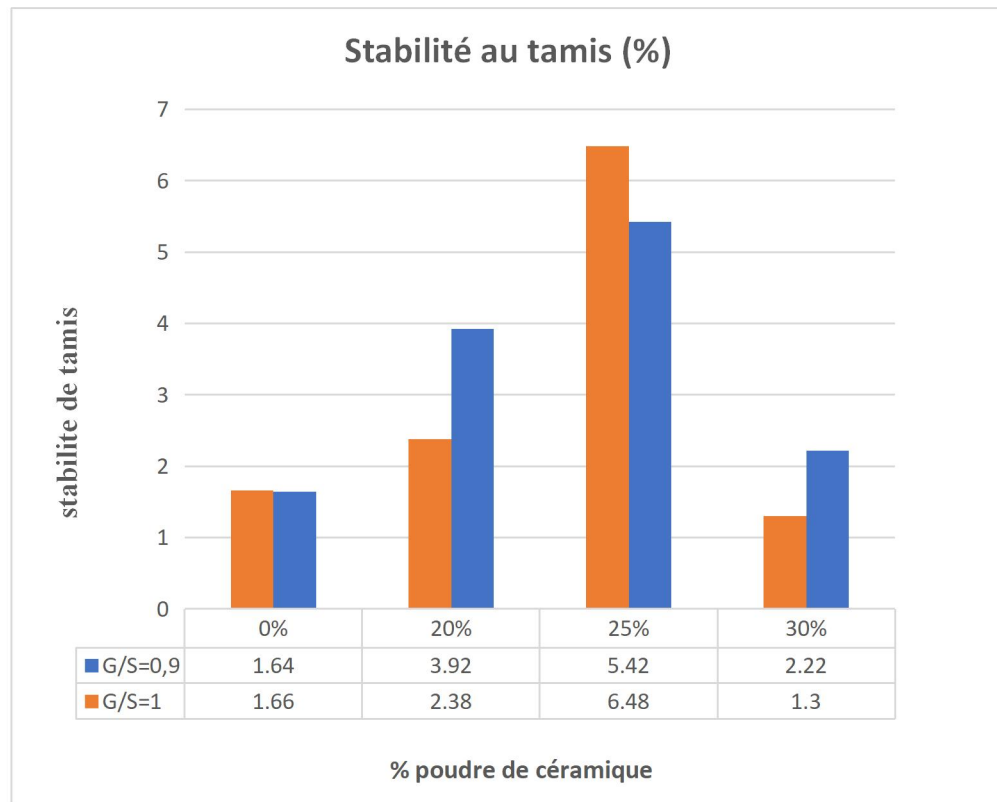


Figure IV.3. Résultats de l'essai de Stabilité au tamis

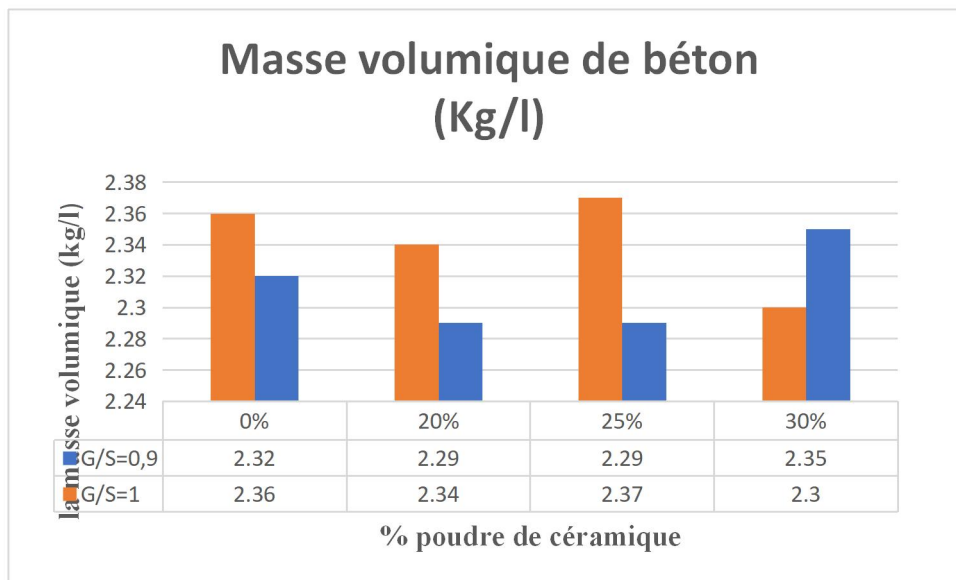


Figure IV.4. Les variations de la masse volumique des différents BAP formulés

Commentaires :

Les compositions des bétons autoplaçants formulés dans notre étude, présentent une caractéristique distincte : une bonne fluidité sans ségrégation ni ressuage. L'absence ou la très faible présence d'aurole de laitance à la périphérie des galettes de béton (de l'ordre de 1 à 2 mm) est remarquable. De plus, les gros granulats ont été correctement entraînés par la matrice cimentaire, évitant ainsi leur accumulation au milieu des galettes de béton.

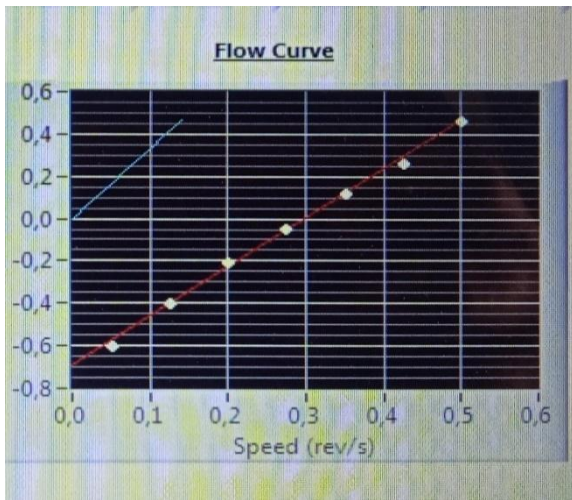
Il est observé que tous les bétons autoplaçants testés respectent le critère d'étalement. Les valeurs spécifiées se situent entre 65 et 75 cm, ce qui correspond aux mélanges **BAP_{0,9-0}** à **BAP₁₋₀**.

Les résultats des essais effectués sur la boîte en L, démontrent clairement que les bétons répondent aux critères satisfaisants, avec des rapports compris entre 80 ET 89% (toutes les valeurs étant supérieures à 80%). La figure IV.3 met également en évidence que tous les BAP présentent un taux de ségrégation (laitance) inférieur à 15%, ce qui témoigne d'une bonne stabilité. La figure IV.3 illustre clairement l'influence du rapport G/S, où l'on constate que plus ce rapport augmente, plus le taux de laitance diminue.

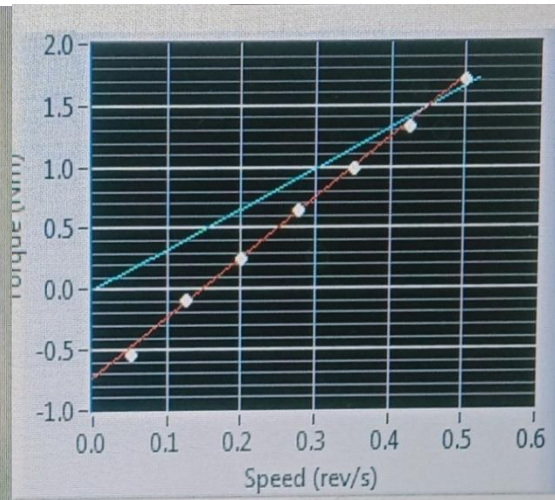
À mesure que le pourcentage de PC (poudre de céramique) augmente, on observe également une diminution de la masse volumique des BAP, tant pour le rapport G/S=1 (passant de 2,37 kg/l à 2,3kg/l (entre 20% et 25% et 30%)) que pour le rapport G/S=0.9 (passant de 2,35kg/l à 2,29 kg/l).

IV.2.1.1. Comportement rhéologique des BAP

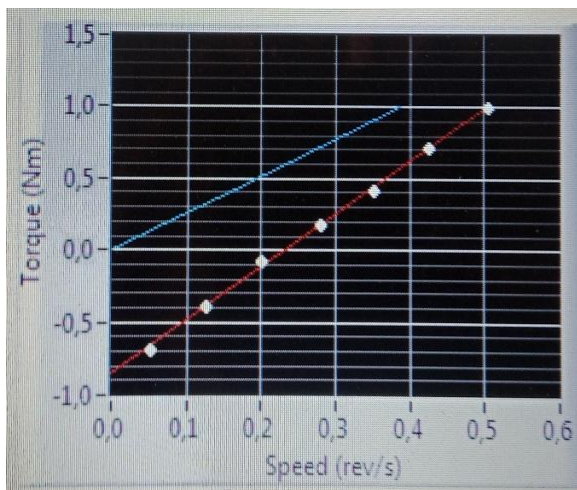
La mesure de deux grandeurs est requise pour évaluer l'ouvrabilité du béton : son seuil de cisaillement τ_0 et sa viscosité μ . Effectivement, afin de faciliter la mise en place du béton (béton à pompe, facile d'insertion de la cage d'armatures), il est nécessaire que son seuil de cisaillement soit bas et qu'il présente une viscosité modérée. De plus, afin de garantir une certaine résistance à la ségrégation, il est nécessaire que la viscosité du béton soit modérée. Afin de mesurer ces paramètres, cette étude a employé un rhéomètre rotatif de type ICAR. Un logiciel est utilisé pour gérer ce rhéomètre.



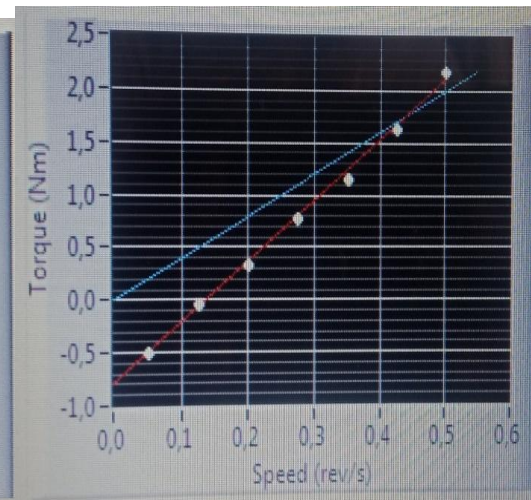
BAP_{0,9-0}



BAP_{0,9-20}

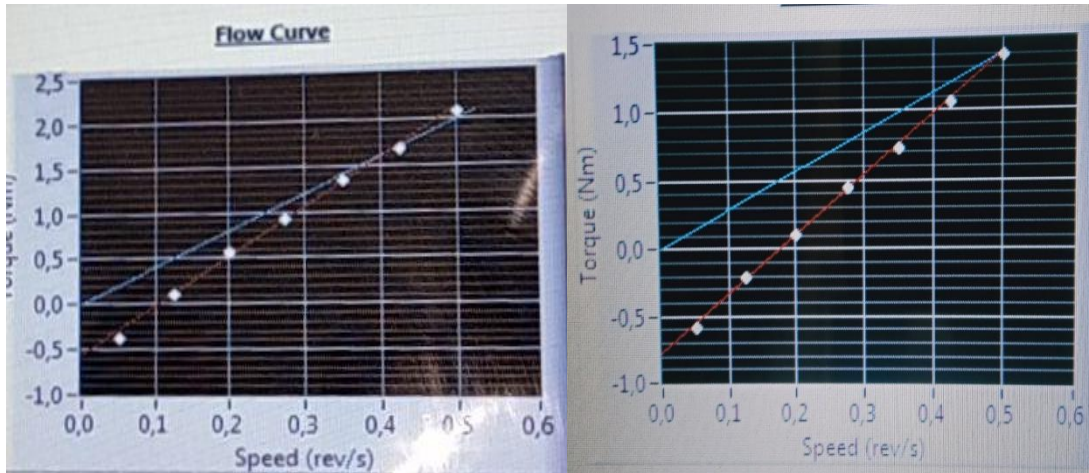


BAP_{0,9-25}

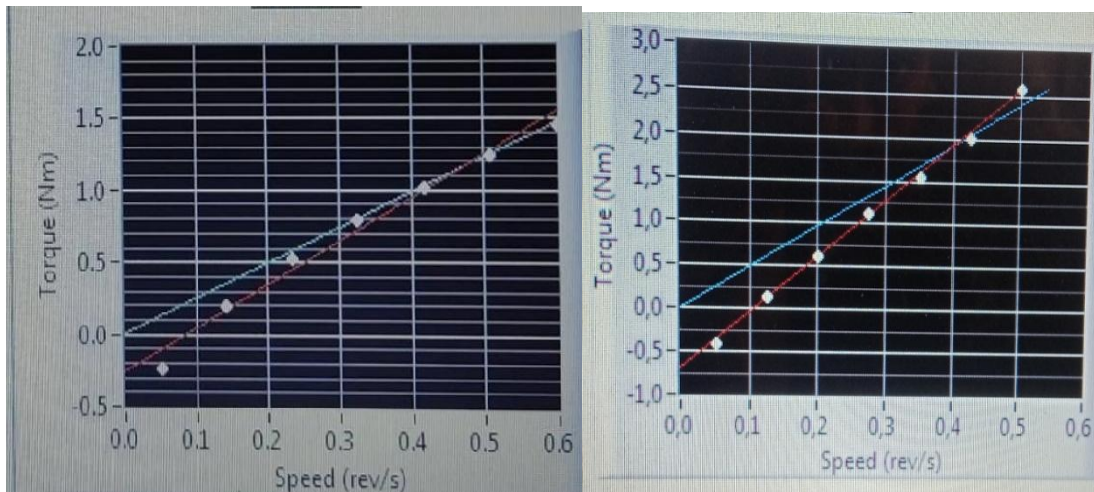


BAP_{0,9-30}

Figure IV.5. Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) pour $G/S=0,9$



BAP₁₋₀BAP₁₋₂₀

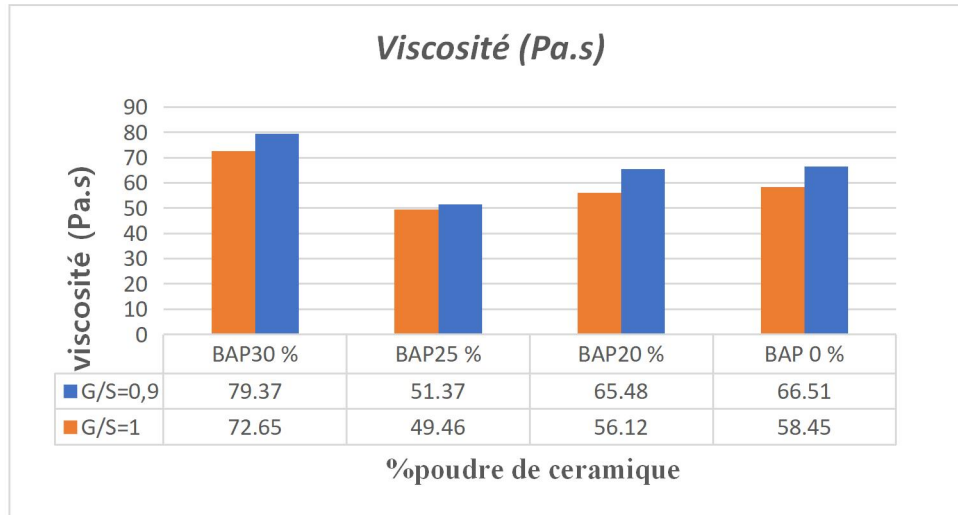


BAP₁₋₂₅BAP₁₋₃₀

Figure IV.6. Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) pour le rapport G/S= 1

Tableau IV.2. Résultats de la viscosité

Type du béton	Viscosité (Pa.s)	
	G/S =0.9	G/S = 1
BAP (0% PC)	66.51	58.45
BAP (20% PC)	65.48	56.12
BAP (25% PC)	51.37	49.46
BAP (30% PC)	79.37	72.65



FigureIV.7. Les variations de la viscosité des différents BAP formulés

Commentaires :

Le tableau et la figure précédents illustrent le comportement rhéologique d'un BAP en fonction des différents pourcentages de poudre de céramique.

Les valeurs de viscosité présentent une variation allant de 49.46 pour le mélange BAP₁₋₂₅ et 79.37 et mélange BAP_{0,9-30}

Nous pouvons conclure que les mélanges étaient suffisamment fluides pour obtenir une viscosité satisfaisante.

Le seuil d'écoulement du BAP doit être bas afin de permettre un démarrage rapide de l'écoulement.

IV.3. Résultats des essais à l' état durci

IV.3.1.Les essais des tractifs

IV.3.1.1.La résistance à la compression

Le tableau IV.3 présente les valeurs moyennes de la résistance à la compression, à différents âges pour les huit bétons.

Tableau IV.3. La résistance à la compression des BAP

Type de BA	Résistance à la compression (MPa)					
	7 j		14 j		28 j	
	G/S= 0.9	G/S=1	G/S= 0,9	G/S=1	G/S=0.9	G/S=1
BAP (0%)	33.63	42.29	33.38	46.9	42.33	55.69
BAP(20%)	29.38	29.89	39.25	34.70	42.10	38.12
BAP (25%)	29.94	27.99	32.40	32.26	42.15	37.75
BAP (30%)	25.18	27.91	30	33.42	39.14	36.45

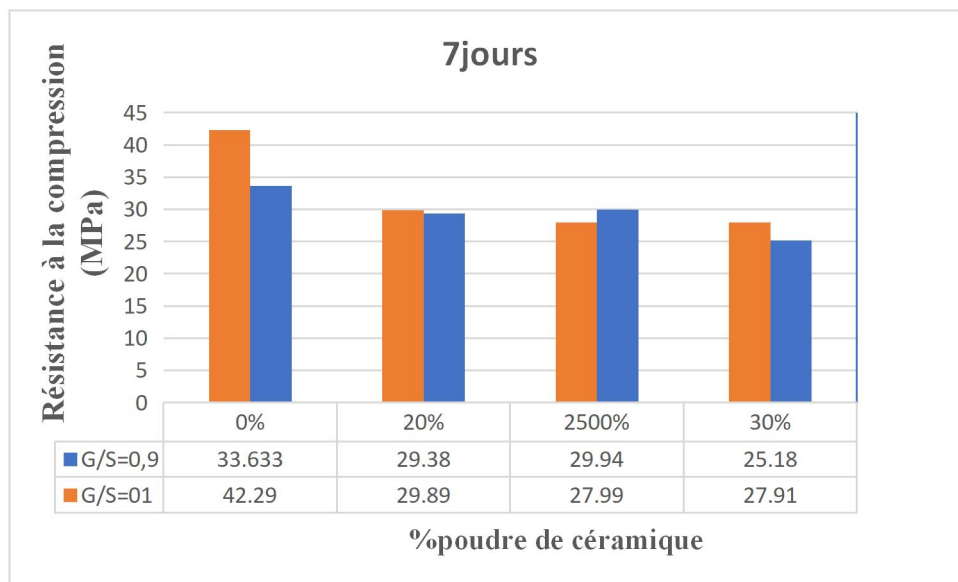


Figure IV.8. Résistance à la compression des BAP à 7 jours

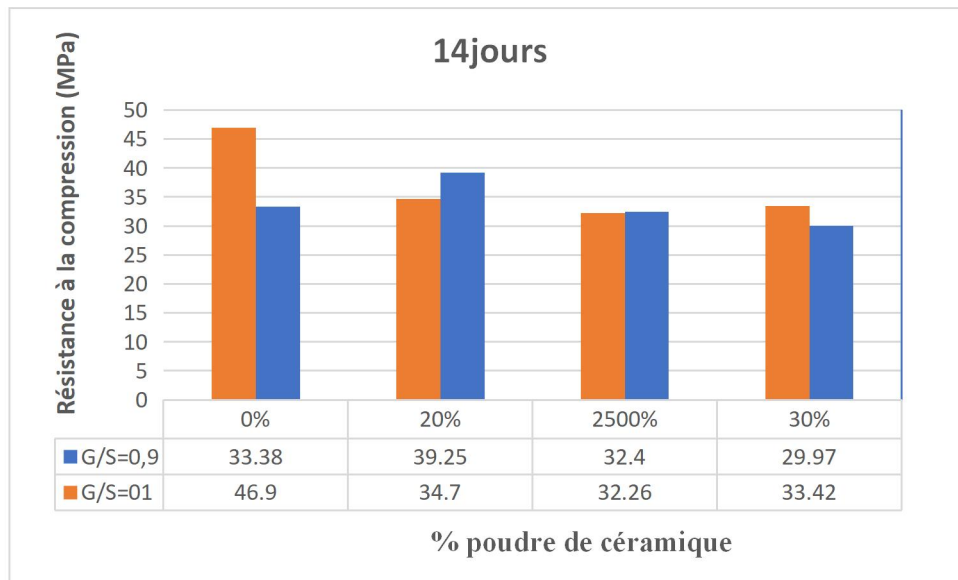


Figure IV.9. Résistance à la compression des BAP à 14 jours

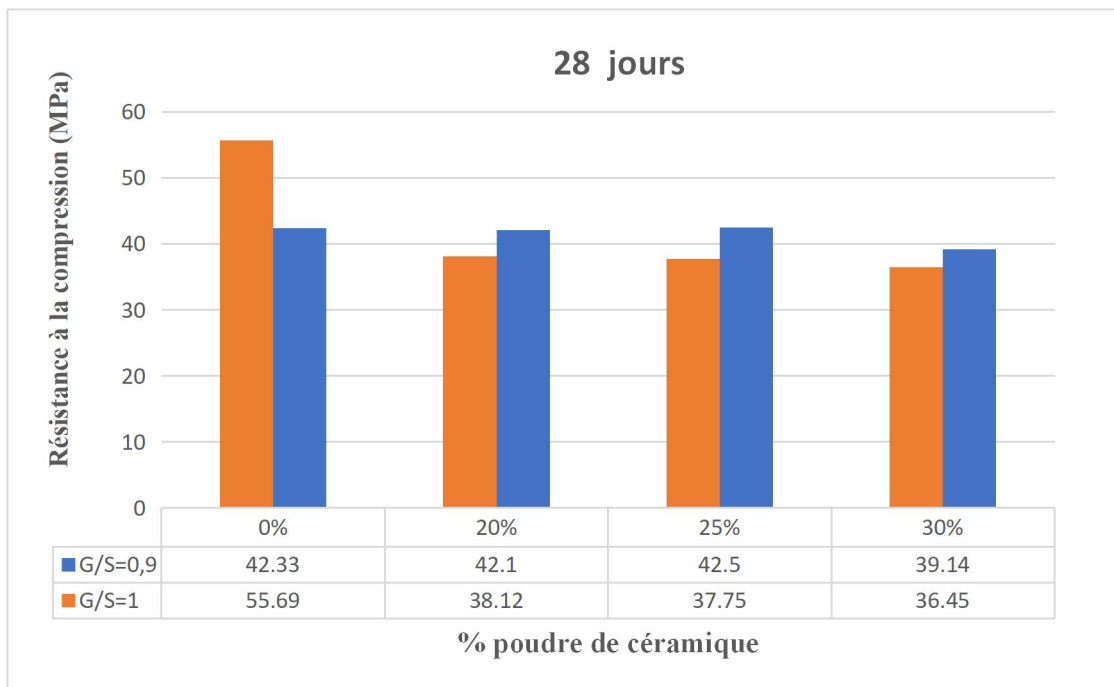


Figure IV.10. Résistance à la compression des BAP à 28 jours

Interprétation :

- L'ajout de céramique dans le mélange ayant un $G/S=1$, semble avoir un effet négatif sur la résistance à la compression. Cette diminution pourrait être due à plusieurs facteurs, tels que la compatibilité des matériaux, la microstructure du béton modifié, ou des interactions spécifiques entre les particules de céramique et

la matrice cimentaire.

- Contrairement à l'effet observé avec un rapport G/S de 1, l'ajout de céramique pour un rapport G/S de 0,9 n'a pas un impact aussi négatif sur la résistance à la compression jusqu'à un certain point. Les résultats montrent une légère fluctuation autour de 42 MPa pour les pourcentages de 0%, 20% et 25% de céramique, avec une baisse plus prononcée à 30%. Cela suggère que jusqu'à 25% de céramique, l'effet sur la résistance est minimal, mais au-delà de ce pourcentage, la résistance diminue de manière plus significative.
- Une proportion de 30% de céramique entraîne une diminution notable de la résistance à la compression, suggérant que ce niveau d'ajout peut affecter négativement les propriétés structurales du béton.
- L'ajout de céramique jusqu'à 25% semble viable en termes de maintien de la résistance à la compression du béton, tandis que 30% de céramique commence à avoir un impact significatif sur la performance mécanique. Cela pourrait être dû à des changements dans la microstructure du béton ou une interaction moins favorable entre les particules de céramique et la matrice cimentaire à des taux plus élevés. Pour des applications nécessitant une résistance mécanique élevée, il serait prudent de limiter l'ajout de céramique à 25% ou moins.

Tableau IV.4. La résistance à la traction par flexion

Type de BAP	Résistance à la flexion (MPa)		
	7 j	14 j	28 j
BAP_{0,9-0}	6.06	6.21	6.42
BAP₁₋₀	6.86	6.86	7,10
BAP_{0,9-20}	5.3	4.98	8.21
BAP₁₋₂₀	4.6	5.85	6.73
BAP_{0,9-25}	4.97	5.8	6.47
BAP₁₋₂₅	4.65	5.68	5,90
BAP_{0,9-30}	4.75	5.12	5.72

BAP₁₋₃₀	4.92	5.05	6.80
---------------------------	------	------	------

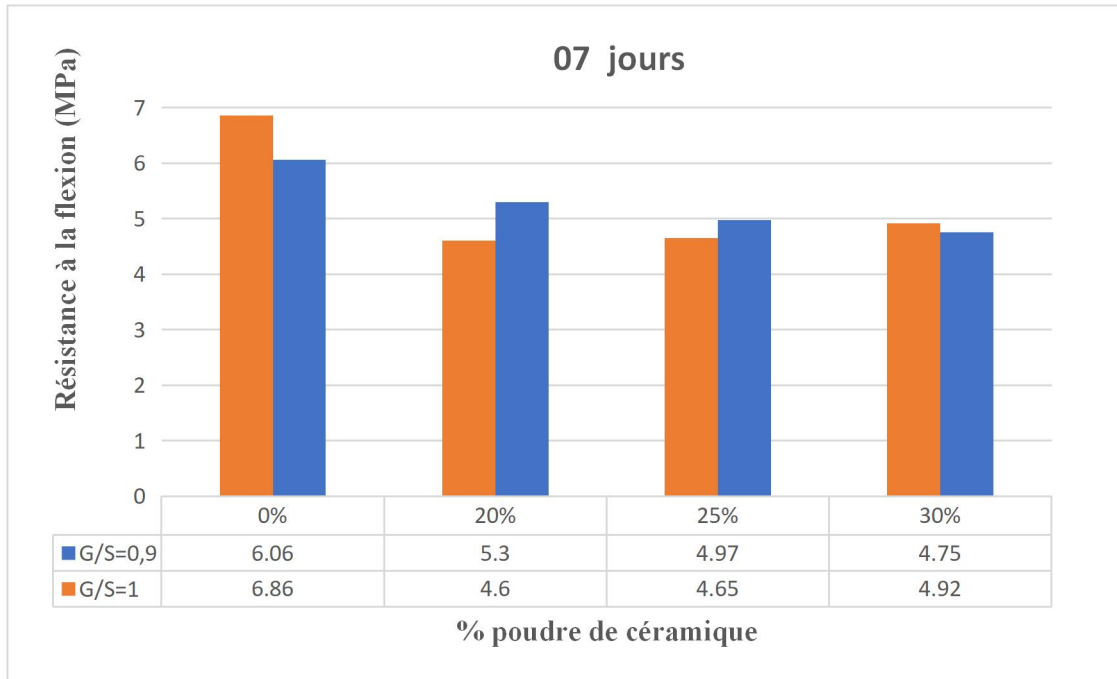


Figure IV.11. Histogrammes des résistances à la flexion du BAP à 7 jours

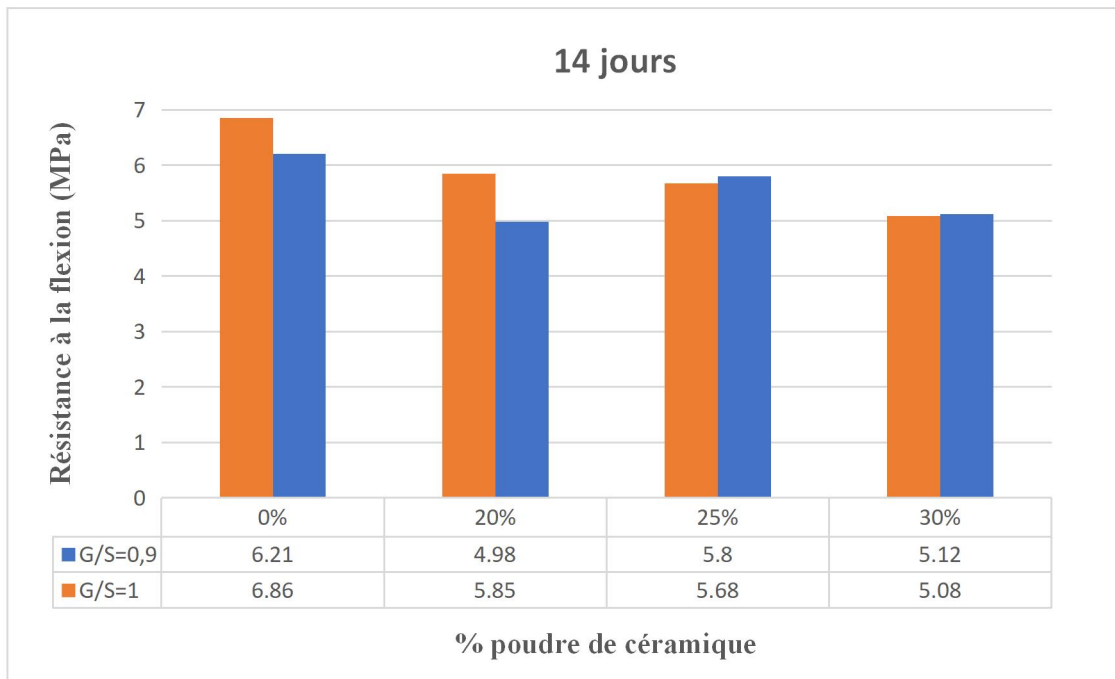


Figure IV.12. Histogrammes des résistances à la flexion du BAP à 14 jours

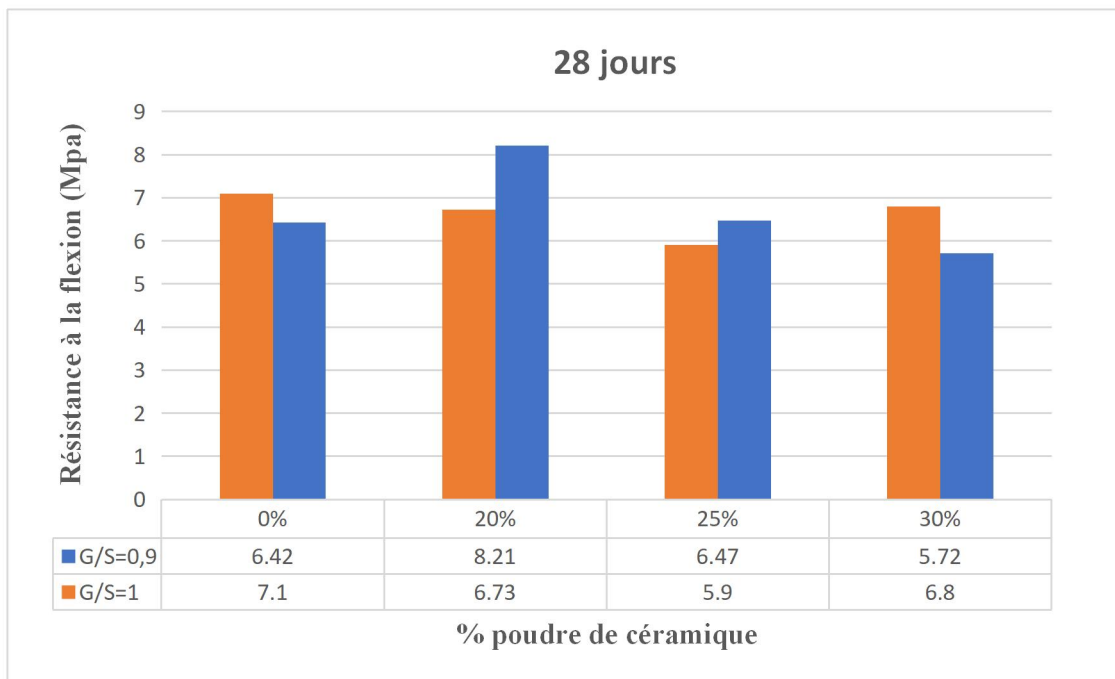


Figure IV.13. Histogrammes des résistances à la flexion du BAP à 28 jours

Interprétation :

La résistance à la traction par flexion est une mesure de la capacité d'un matériau, comme le béton, à résister à la formation de fissures lorsqu'il est soumis à des forces de flexion.

Des valeurs comprises entre 5,72 MPa et 8.21 MPa sont donc considérées comme très bonnes, indiquant que le béton testé a une performance supérieure à la moyenne à 28 jours.

IV.3.2. Les essais non destructifs

Des tests d'auscultation dynamique ont été effectués pour évaluer la vitesse de propagation des ultrasons, ainsi que des tests au scléromètre pour évaluer la résistance en utilisant l'indice scléromètre I_s . Les tests ont été réalisés sur des échantillons cylindriques immergés pendant une période de 28 jours.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau ci-dessous, qui sera ensuite illustré par des histogrammes. La vitesse de propagation du son dans un matériau est influencée par sa densité et son élasticité. Pour le béton, cette mesure peut révéler des informations importantes sur la qualité, la densité, la cohésion interne et la présence éventuelle de défauts ou de fissures.

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

<i>Type de BAP</i>	<i>Vitesse de propagation (m/s)</i>	<i>Résistance par scléromètre R_s (MPa)</i>
BAP1-0	4261	38
BAP2-0	4604	38
BAP1-20	4407	28
BAP2-20	4401	31
BAP1-25	4255	30
BAP2-25	4283	34
BAP1-30	3088	28
BAP 2-30	3125	31

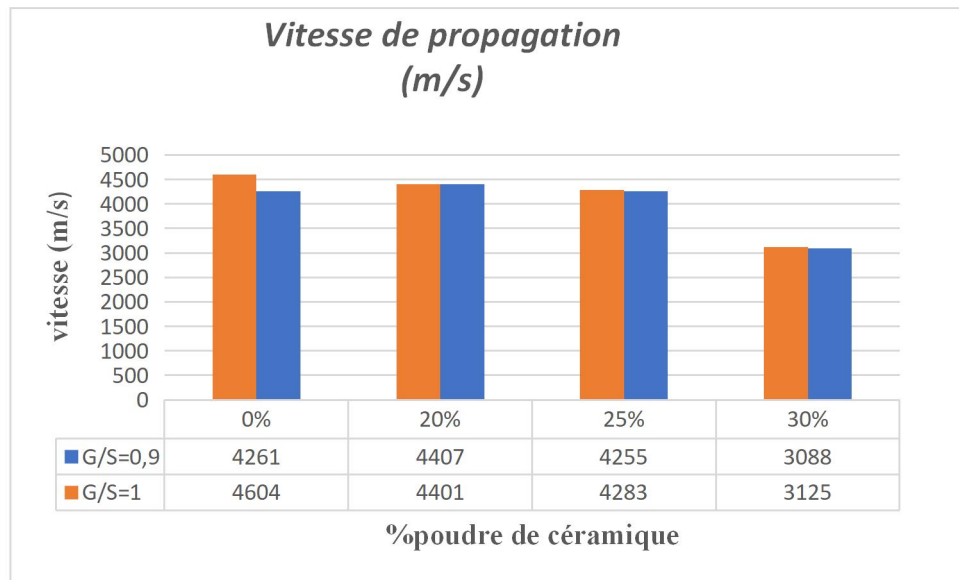


Figure IV.14. Vitesse du son des différents types de béton

Interprétation :

- Des vitesses élevées (au-delà de 3000 m/s) suggèrent que le béton est dense et possède une bonne cohésion interne, et que le mélange a été correctement dosé, et durci de manière adéquate, minimisant ainsi les vides et les fissures internes.
- il est probable que le béton ne présente pas de défauts majeurs tels que des fissures ou des cavités importantes. Les ondes sonores traversent plus facilement un matériau homogène et sans défauts significatifs.

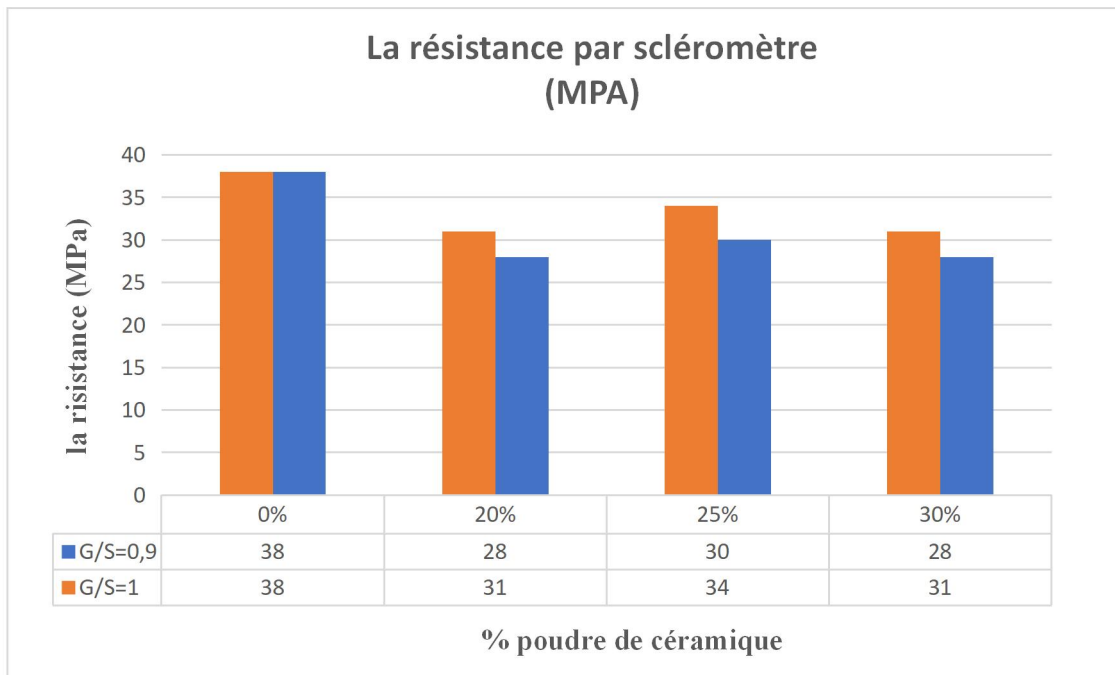


Figure IV.15. Histogrammes des résistances au scléromètre

Interprétation :

La plage de 38 MPa à 28 MPa, à 28 jours, montre une variation de 10 MPa dans les résistances au scléromètre. Cette variation peut être due à plusieurs facteurs, tels que la qualité du béton, la composition du mélange, le processus de durcissement, et les conditions environnementales.

Bien que la valeur 28 MPa soit inférieure à 38 MPa, elle reste dans une gamme respectable de résistance au scléromètre. Cela indique encore une certaine robustesse du béton en surface.

IV.4. Conclusion

Dans le cadre de l'étude sur les bétons autoplaçants (BAP), l'analyse des résultats et leurs interprétations offrent un aperçu crucial des performances et des implications de ce matériau innovant dans le domaine de la construction.

Conclusion générale

L'intégration des déchets de céramique dans le béton représente une stratégie viable pour valoriser ces matériaux tout en améliorant certaines propriétés du béton. Toutefois, l'optimisation du pourcentage de céramique est essentielle pour garantir que les propriétés mécaniques et la durabilité ne soient pas compromises. Des recherches continues sont nécessaires pour affiner les mélanges et maximiser les avantages.

Cette approche offre une solution durable et économique pour la gestion des déchets industriels, contribuant ainsi à une construction plus écologique et durable.

- Les compositions des bétons autoplaçants leur permettent d'être extrêmement fluides sans ségrégation ni ressuage, ce qui est d'ailleurs leur particularité. La qualité des galettes de béton est démontrée par l'absence ou la très faible présence (de 1 à 2 mm) d'auréole de laitance à la périphérie. En outre, la matrice cimentaire entraîne de manière adéquate les gros granulats, ce qui évite qu'ils ne soient amoncelés au milieu des galettes de béton.
- Il est possible de conclure que les mélanges étaient assez fluides pour avoir une viscosité moins élevée. La viscosité du béton autoplaçant est influencée par la nature de la poudre de céramique et sa granulométrie, ainsi que par la finesse des ciments utilisés.
- Dans l'état durci, les résultats montrent une résistance relativement stable jusqu'à 25% de céramique, avec une diminution notable à 30%, à mentionner que le dosage du ciment n'est que (320, 300 et 280) Kg pour les trois pourcentages en ordre croissant.
- Les résistances pour le rapport $G/S=0,9$ sont plus élevées que celles du rapport $G/S=1$.
- Des vitesses de son élevées (au-delà de 3000 m/s) suggèrent que le béton est dense et possède une bonne cohésion interne, et que le mélange a été correctement dosé, et durci de manière adéquate, minimisant ainsi les vides et les fissures internes.
- La plage de résistances au scléromètre entre 38 MPa et 28 MPa indique une gamme de performances du béton qui fournissent des indications utiles sur la qualité et la robustesse du béton en surface.

Pour explorer davantage l'utilisation de la poudre de céramique dans la formulation des BAP, voici quelques recommandations : Évaluer la résistance à long terme des BAP avec poudre de céramique sous des conditions environnementales variées, y compris l'exposition à des cycles

Conclusion générale

thermiques, à l'abrasion, et à des agents agressifs, pour déterminer la stabilité et la durabilité du matériau.

Références bibliographiques

- [1] OKAMURA.H., OZAWAK, "Selfcompactable high performance concrete in Japan" ACI International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok, Thailand. (1994).
- [2] CSTC (centre de recherche), Béton et ouvrages en béton, rapport d'activités, Belgique, 2004.
- [3] FICHES TECHNIQUES TOME 2, LES BETONS : formulation fabrication et mise en œuvre.
- [4] BOUSSAFER A. Formulations des bétons autoplaçants par la méthode japonaise D'OKAMURA présenté ; Université Constantine thème master 2010-2011.
- [5] Benaddad .S, Benatsou. N, "Etude à la compression d'un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires)", Mémoire de Master. Université d'Abderrahmane Mira-Bejaia, 2012.
- [6] **Boukni Bariza**, *Tenue au Feu des Bétons Autoplaçants*, Mémoire de Magister, université Mentouri, constantine, 2007, 159p.
- [7] **P.ROUGEAU** et **CHMARRY DIPPE, O.FRANCY**, Les **BAP** : synthèse des **connaissances** et **compagne** expérimentale, CERIB, février 2001.
- [8] Googlephotos/Phénomène de blocage des granulats.com
- [9] BOUCHENE BYACINE,
Retrait plastique des bétons autoplaçants, mémoire de magistère, université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2011.
- [10] Assie S. « Durabilité des bétons autoplaçants », thèse de doctorat de L'INSA de Toulouse, 2004.
- [11] Hanaa Fares, « 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.
- [12] Le site : <https://www.infociments.fr>
- [13] Bourema Moufida, Etude des caractéristiques d'un BHP à base de déchets de brique rouge à l'état frais et durci, mémoire de master en génie civil, Université de 20 Aout 1955-Skikda, 11 Juin 2015.
- [14] Projet National de Recherche CERIB, " béton autoplaçant BAP " France, Octobre 2001.
- [15] 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, 2012.
- [16] CRESPIN, X.(no date) Plastifiants & Superplastifiants, Synad. Disponible sur : <https://stopalajoutdeau.synad.fr/> (Accessed: 24 June 2023).
- [17] ROUGEAU et CHMARRY DIPPE, O.FRANCY, Les BAP: synthèse des connaissances et compagne, expérimentale, CERIB, février 2001.

- [18] RisselKhelifa.M, Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants, thèse de doctorat, université de Constantine et l'université d'Orléans génie civil. 2009.
- [19] IZUMI, I., YONEZAWA, T., IKEDA, Y., MUTA, A. (1995) "Placing 10 000 m³superworkableconcrete for guide track structure of retractablerof of Fukuoka Dome, Supplementary" Papers, 2nd CANMET \ACI.
- [20] Le site : <http://beton-bap.blogspot.com/2015/02/methodes-de-formulation.html>.
- [21] Messaoudifarih, Influences des agents de viscosité sur les paramètres rhéologiques intrinsèques des mortiers des bétons autoplaçants, Thèse de doctorat, université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU, 2016.
- [22] <https://www.theses-algerie.com/2636036135776488/these-de-doctorat/universite-aboubekrbelkaid---tlemcen/etude-du-comportement-rheologique-des-betons-autopla%C3%A7ants-locaux-> (Accessed: 24 June 2023)
- [23] Conrrazé G., Grossiord J.L. "Initiation à la rhéologie", Tec & Doc, 3ème édition. (2000).
- [24] Evans., Letter of the editor : on the nature of the yield stress, 1992.
- [25] Collection Technique CIM béton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : Formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre 2006
- [26] <https://www.aquaportail.com/definition-4682-rheometre.html>
- [27] F.Gabryszak, sino dato « Les bétons : Chapitre 04 », Ecole polytechnique fédérale de LAUSANE, institut des matériaux.
- [28] <https://fr.scribd.com/document/252862862/Tp-n-5-Analyse-Par-Ultrasons-de-Beton-Durci>.
- [29] K. Meena, et al. (2019). "Effect of ceramic powder on properties of self-compacting concrete". Journal of Building Engineering, 25, 100796. [DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100796]
- [30] M. Sonebi, et al. (2018). "Performance of Self-Compacting Concrete Incorporating Ceramic Powder Subjected to Different Curing Regimes". Materials, 11(3), 356. [DOI: 10.3390/ma11030356].
- [31] A. Aliabdo, et al. (2016). "Influence of Ceramic Powder on the Performance of Self-Consolidating Concrete". Materials, 9(4), 272. [DOI: 10.3390/ma9040272].
- [32] S. Sahoo, et al. (2015). "Investigation of fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing ceramic wastes". Construction and Building Materials, 77, 381-390. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.003].

[33]S. Sonebi, et al. (2012). "Properties of fresh and hardened self-compacting concrete incorporating ceramic wastes as coarse aggregate replacement". *Materials & Design*, 35, 48-55. [DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.030].