



République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji-Laghouat

FACULTÉ DE GÉNIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GÉNIE CIVIL

OPTION : MATÉRIAUX EN GENIE CIVIL

Thème

**Etude de l'influence de la substitution du sable par du laitier
et du kaolin sur les propriétés des bétons autoplaçants aux
états frais et durci**

Présenté par :

- **SOUALMI ILYAS**
- **YAGOUB AISSA**

Jury de soutenance :

| Nom et Prénom | Grade | Qualité |
|----------------------------|-------------------------|----------------|
| Mr. Goual Idriss | Professeur | Président |
| Mme. Merghoub Massouda | Maître assistant A | Examinatrice |
| Mr. Boukhelkhal Aboubakeur | Maître de conférences B | Rapporteur |
| Mr. Bouziani Tayeb | Professeur | Co-rapporteur |

Promotion : 2019/2020

Remerciements

C'est grâce à Allah le tout puissant que nous cueillons aujourd'hui le fruit de plusieurs années d'études sans relâche Qu'il soit loué et remercié en premier lieu.

Nous tenons à remercier nos encadreurs, monsieur Boukhelkhal Aboubakeur et monsieur Bouziane Tayeb d'avoir accepté de nous encadrer pour la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour leurs précieux conseils et orientations.

Notre reconnaissance revient aux membres du jury, monsieur Goual Idriss et madame Merghoub Massouda pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous remercions également tout le personnel du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat, en particulier monsieur Brahim Hamdi pour le meilleur accueil qu'il nous a réservé.

Nous exprimons notre gratitude à monsieur Ahmed Adjalet directeur de laboratoire de contrôle technique de la construction LACOTECH et à Monsieur Aissa Ranane directeur de l'entreprise de CREAGROUP pour leurs aides et leurs générosités.

Mes remerciements sont adressés à nos enseignants pour leur contribution durant notre cursus universitaire et à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de projet de fin d'étude.

Nous remercions très sincèrement mes amis Ibrahim, Oussama, Redha et Sief Eldin, et nos collègues de département de génie civil pour leur encouragement.

En fin, je ne sais pas si, un simple merci suffirait pour exprimer le mérite et la dette que j'ai envers mes parents, je les remercie du profond de mon cœur pour leurs soutiens, et leurs patiences.

Merci

Dédicace

En premier lieu, je dédie mon Dieu pour sa réussite tout au long de mon parcours éducatif.

Je dédie cet humble travail aux chers phares et à mes chers parents, pour leur soutien tout au long de ma vie que Dieu les garde.

Le dédier à mes chers frères et à toute la famille que Dieu les garde.

Sans oublier Ma chère fiancée, que Dieu le protège.

Et mon collègue Aissa qui a partagé cet effort scientifique avec moi.

Ilyas

Dédicace

Tout d'abord je remercie Dieu Tout-Puissant pour son succès ;

Je dédie cet effort à mes parents, qui ont un grand mérite dans tout ce que j'ai réussi, et il leur a trouvé les moyens du salut et du succès dans ce monde et dans l'au-delà ;

À mes amis Aissa , Farouk, Abdel Jalil, Zakaria et Salah El-Din qui se tenaient à mes côtés et m'ont aidé de tout ce qu'ils pouvaient ;

Et mon collègue Ilyas qui a partagé cet effort scientifique avec moi.

Aissa

ملخص

تُعرف الخرسانة ذاتية الرص بتجانسها وسيولتها، مما يسمح لها بالتموضع في مكانها فقط تحت تأثير وزنها. أدى استخدام الركام في تصنيع الخرسانة لعدة عقود إلى استنفاد الموارد الطبيعية ومن ثم ظهرت الحاجة إلى البحث عن مصادر أخرى للركام. يُنظر الآن إلى تقييم النفايات وإعادة استخدامها على أنها طريقة لسد الفجوة بين الإنتاج والاستهلاك وحماية البيئة. يهدف هذا العمل إلى إبراز إمكانية استخدام المخلفات مثل الخبث الافران والمصادر الطبيعية الأخرى مثل الكاولين من أجل تقليل استهلاك الركام وخاصة رمل الوادي والحفاظ عليها للأجيال القادمة.

تم تحديد واختبار 6 خلطات خرسانية. يحتوي الخليط المرجعي على 100% من الرمل الغريني، بينما في الخلطات الأخرى قمنا باستبدال الرمل الغريني برمل الكاولين بنسب مختلفة (20 ، 40 ، 60 ، 80 و 100%). الاختبارات التي أجريت في الحالة الطرية هي: الانتشار، التدفق، الانتشار J-Ring و مقاومة للانفصال الحبيبي. في حالة المتصلبة ، تم قياس ثلاث خصائص: المقاومة للضغط ولإلحناء وامتصاص الماء عن طريق الغمر الكلي.

أظهرت النتائج أن إضافة رمل الكاولين بنسبة تزيد عن 20% يتطلب زيادة في تركيز الملدن المتفوق من أجل الحصول على السيولة المطلوبة. في الحالة المتصلبة ، أدى الاستبدال الجزئي لرمل الكاولين إلى انخفاض في مقاومة للضغط ولإلحناء. زيادة نسبة رمل الكاولين من 20% إلى 100% يجعل الخرسانة أكثر نفاذية للماء.

الكلمات المفتاحية: الرمل الغريني استبدال، كاولين، سيولة، مقاومة ، إمتصاص الماء.

Résumé

Le béton autoplaçant est connu pour son homogénéité et sa fluidité, ce qui lui permet de ne tenir en place que sous l'influence de son propre poids. L'utilisation des granulats dans la fabrication du béton autoplaçant pendant de nombreuses décennies a conduit à l'épuisement des ressources naturelles d'où la nécessité de rechercher d'autres sources pour les granulats. L'évaluation et la réutilisation des déchets sont désormais considérées comme un moyen de combler le fossé entre la production, la consommation et la protection de l'environnement. Ce travail vise à mettre en évidence la possibilité d'utiliser des déchets tels que le laitier et d'autres sources naturelles telles que le kaolin en vue de réduire la consommation de granulats particulièrement le sable et de les préserver pour les futures générations.

6 mélanges de béton autoplaçant ont été désignés et testés. Le mélange de référence contient 100% du sable alluvionnaire, tandis dans les autres mélanges le sable alluvionnaire est substitué par de sable de kaolin avec différents pourcentages (20, 40, 60, 80 et 100%). Les essais réalisés à l'état frais sont : étalement, temps d'écoulement, indice de ségrégation et différence d'hauteurs au J-Ring. A l'état durci, trois caractéristiques ont été mesurés : résistances à la compression et à la flexion et l'absorption d'eau par immersion.

Les résultats obtenus montrent que l'introduction du sable de kaolin avec un pourcentage supérieur à 20% nécessite une augmentation du dosage de superplastifiant pour avoir la fluidité désirée. À l'état durci, le remplacement partiel du sable kaolin mène à une diminution des résistances à la compression et à la flexion. L'augmentation du pourcentage de sable de kaolin de 20% à 100% rend le béton plus perméable à l'eau.

Mots clés : sable alluvionnaire, substitution, kaolin, fluidité, résistance, absorption d'eau.

Table de matières

| | |
|-----------------------------|-----|
| Remerciements..... | I |
| Dédicace..... | II |
| ملخص..... | III |
| Résumé..... | IV |
| Liste des figures..... | V |
| Liste des tableaux..... | VI |
| Introduction générale | VII |

Chapitre 1 : Généralités sur les bétons autoplaçant

| | |
|---|-----------|
| 1.1 Introduction..... | 3 |
| 1.2 Caractérisation de béton autoplaçant a l'état frais..... | 3 |
| 1.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams..... | 3 |
| 1.2.2 Essai de la boîte en L..... | 4 |
| 1.2.3 Essai de stabilité au tamis..... | 5 |
| 1.3 Les principaux constituants des BAP..... | 6 |
| 1.3.1 Matériaux de base..... | 6 |
| 1.3.2 Les granulats..... | 6 |
| 1.3.3 Le ciment..... | 7 |
| 1.3.4 L'eau de gâchage..... | 7 |
| 1.3.5 Additions minérales..... | 7 |
| 1.3.6 Adjuvants chimiques..... | 8 |
| 1.3.7 Les superplastifiants..... | 8 |
| 1.3.8 Les agents colloïdaux..... | 9 |
| 1.3.9 Autres additions..... | 10 |
| 1.4 Formulation du BAP..... | 10 |

Chapitre 2 : Valorisation des déchets comme granulats pour bétons

| | |
|--|-----------|
| 2.1. Introduction..... | 12 |
| 2.2. Granulats..... | 12 |
| 2.2.1.Provenance des granulats..... | 12 |
| 2.2.2.Propriétés des granulats..... | 14 |
| 2.3.Valorisation des déchets comme granulats..... | 17 |
| 2.3.1.Béton démolie..... | 18 |
| 2.3.2.Déchets de brique..... | 19 |
| 2.3.3.Déchets de marbre..... | 20 |
| 2.3.4.Déchets de granite..... | 21 |
| 2.3.5.Déchets de céramique..... | 22 |
| 2.3.6.Déchets de plastique..... | 23 |
| 2.3.7.Déchets de verre..... | 24 |
| 2.3.8.Déchets de caoutchouc..... | 25 |
| 2.3.9.Laitier de hauts fourneaux..... | 26 |

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux, formulation et protocole d'essais

| | |
|---|-----------|
| 3.1. Introduction..... | 21 |
| 3.2. Caractérisation des matériaux..... | 21 |
| 3.2.1. Sable..... | 21 |
| 3.2.2. Gravier | 23 |
| 3.2.3. Ciment..... | 24 |
| 3.2.4. Adjuvant | 24 |
| 3.2.5. Eau de gâchage..... | 25 |
| 3.3. Formulation..... | 25 |
| 3.3.1. Formulation du mortier autoplaçant. | 25 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4. Protocole d'essais..... | 26 |
| 3.4.1. Essais sur mortier frais..... | 26 |
| 3.4.2. Essais sur BAP à l'état frais..... | 27 |
| 3.4.3. Essais sur BAP à l'état durci..... | 31 |

Chapitre 4 : Présentation et analyse des résultats

| | |
|---|-----------|
| 4.1 Introduction..... | 33 |
| 4.2 Essais sur MAP à l'état frais..... | 33 |
| 4.4.1. Optimisation de rapport SP/C..... | 33 |
| 4.3 Essais sur BAP à l'état frais..... | 35 |
| 4.3.1. L'étalement de cône d'Abrams..... | 35 |
| 4.3.2. Le temps d'écoulement T50..... | 36 |
| 4.3.3. L'étalement de J-ring..... | 36 |
| 4.3.4. BJ de la couronne J (J-Ring test)..... | 37 |
| 4.3.5. Essai de stabilité au tamis | 38 |
| 4.4 Essais sur BAP à l'état durci..... | 38 |
| 4.4.1. Résistance à la compression..... | 38 |
| 4.4.2. Résistance à la traction par flexion trois points..... | 38 |
| 4.4.3. Absorption d'eau par immersion..... | 39 |
| Conclusion générale..... | 47 |
| Références bibliographiques..... | 48 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1.1. Essai d'étalement..... | 4 |
| Figure 1.2. Essai de boîte en L..... | 5 |
| Figure 1.3. Essai de stabilité au tamis..... | 5 |
| Figure 1.4. Représentation de l'essai de stabilité au tamis..... | 6 |
| Figure 1.5. Pâte de ciment non adjuvantée et pâte de ciment adjuvantée..... | 8 |
| Figure 1.6. Pompage de béton autoplaçant..... | 10 |
| Figure 2.1. éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton..... | 15 |
| Figure 2.2. Variation de l'étalement en en fonction du temps pour différents taux de substitution de sable par granulat de béton. | 19 |
| Figure 2.3. Influence du taux de substitution de sable de brique sur la résistance à la compression des mortiers..... | 20 |
| Figure 2.4. Variation de l'expansion des mortiers en fonction du taux de substitution de sable de brique..... | 20 |
| Figure 2.5. Influence de substitution du sable et du ciment par 10% de poudre de marbre sur la résistance à la compression [24]..... | 21 |
| Figure 2.6. Effet de substitution du sable et gravier naturels par différents pourcentages de déchets de céramique sur l'affaissement du béton..... | 23 |
| Figure 2.7. Effet des grains de plastique sur l'absorption d'eau du béton..... | 24 |
| Figure 2.8. Développement de la résistance à la compression des bétons à base de déchets de verre en fonction du temps..... | 24 |
| Figure 2.9. Masse volumique des bétons en fonction du pourcentage en granulats de caoutchouc..... | 25 |
| Figure 2.10. Résistance à la compression des bétons en fonction du pourcentage en granulats de caoutchouc..... | 25 |

| | |
|--|----|
| Figure 2.11. Variation du retrait total en fonction du temps pour différents pourcentages de substitution de sable de laitier..... | 26 |
| Figure 3.1. Analyse granulométrique des sables utilisés..... | 30 |
| Figure 3.2. Essai d'étalement et les dimensions de Mini-Cône..... | 34 |
| Figure 3.3. Dimension de l'entonnoir V..... | 34 |
| Figure 3.4. Essai d'étalement..... | 35 |
| Figure 3.5. Dimensions du J-ring et positions pour mesure de différence d'hauteur..... | 36 |
| Figure 3.6. Essai de la couronne J (J-Ring test) | 37 |
| Figure 3.7. Essai de stabilité au tamis..... | 38 |
| Figure 3.8. Dispositif de l'essai de la résistance à la compression. | 38 |
| Figure 3.9. Dispositif de l'essai de la résistance à la traction par flexion trois point..... | 39 |
| Figure 4.1. Variation de l'étalement de cône d'Abrams..... | 42 |
| Figure 4.2. Évolution du temps d'écoulement T50 pour différents mélanges de BAP..... | 42 |
| Figure 4.3. Variation de l'étalement de J-ring..... | 43 |
| Figure 4.4. Différence d'hauteurs pour différents mélanges de BAP..... | 43 |
| Figure 4.5. Variation de l'indice de ségrégation pour différents mélanges de BAP..... | 44 |
| Figure 4.6. Résistance à la compression à 28 jours des différents BAP..... | 45 |
| Figure 4.7. Résistance à la flexion à 28 jours des différents BAP..... | 45 |
| Figure 4.8. Absorption par immersion des différents BAP..... | 46 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 2.1. Propriétés mécaniques des bétons à base de sable de laitier..... | 27 |
| Tableau 3.1. Composition chimique du sable de laitier..... | 29 |
| Tableau 3.2. Propriétés physiques des sables utilisés..... | 30 |
| Tableau 3.3. Caractéristiques physiques du gravier utilisé..... | 30 |
| Tableau 3.4. Propriétés physiques, chimiques et mécaniques du ciment Mokaouem..... | 31 |
| Tableau 4.1. Compositions des différents mélanges (pour 1 m ³) et résultats d'essais d'optimisation du rapport SP/C..... | 40 |
| Tableau 4.2. Compositions des différents mélanges de BAP et résultats d'essais l'état frais (pour 1 m ³)..... | 41 |

Introduction générale

L'accumulation de déchets non biodégradables (pneus usagés, bouteilles de verre et plastique) constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs. Cette accumulation est liée à l'explosion démographique des pays en voie de développement accompagnée d'une urbanisation incontrôlée qui favorisent une production importante de déchets qui représente un danger sanitaire. Ils constituent un habitat privilégié des insectes et occasionne un nombre toujours croissant de personnes exposées à la maladie. Ainsi, ces déchets bouchent les canaux d'évacuation provoquant la remontée des eaux sales dans les tuyaux d'évacuation à la surface, les odeurs nauséabondes, l'insalubrité, inondations et la destruction de certaines installations.

Une solution judicieuse consiste à valoriser ces déchets, ce qui offrira dans un futur proche un débouché économique intéressant pour les entreprises fabricant ces produits. Cette approche s'inscrit dans une démarche globale de développement durable.

Les déchets de démolition, agricoles et industriels peuvent être utilisés pour remplacer partiellement ou totalement les granulats naturels utilisés pour la production de divers types de béton. Serifou, 2008, [1] a étudié l'effet du caoutchouc comme granulat dans le béton. Certains travaux ont montré l'intérêt de l'association ciment/caoutchouc dans l'élaboration de composites cimentaires à haute déformabilité (Eldin & Senouci, 1993[2]; Topçu, 1995) [3].

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de substitution du sable alluvionnaire par deux matériaux un naturel qui est le kaolin et l'autre est considéré comme un déchet de la production de l'acier (laitier de hauts fourneaux). Pour mieux évaluer l'effet individuel et combiné des trois types de sable, il sera envisagé d'utiliser le plan d'expériences afin de réduire le nombre d'essais et d'augmenter l'efficacité des résultats obtenus.

En plus de l'introduction générale et de la conclusion générale, le mémoire comporte quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique, dans laquelle on traite les propriétés clés des BAP à l'état frais, puis on s'intéresse aux matériaux constituant le BAP. Le chapitre présente une revue bibliographique sur la valorisation des déchets comme granulats pour la production des éco-bétons. Le troisième chapitre est destiné à la caractérisation des

matériaux entrant dans la composition du BAP, nous expliquerons ensuite la méthode de formulation du mortier et béton autoplaçants. Dans la partie expérimentale, on va s'occuper à la réalisation des essais relatifs à la caractérisation du mortier à l'état frais, et du béton à l'état frais et à l'état durci.

Dans le dernier chapitre, nous exposons et discutons les différents résultats obtenus. Ce chapitre sera suivi par une conclusion générale dans lesquelles sont résumés les principaux résultats obtenus. Des recommandations seront données en fin de ce travail pour des futurs travaux envisagés.

Chapitre 1 :

***Généralités sur les bétons
autoplaçants***

1.1 Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP) ont été développés au Japon à la fin des années 80 [4]. Leur origine semble provenir de la nécessité d'utiliser des matériaux de plus en plus « performants » pour palier une réduction de la qualité des constructions due à une mauvaise mise en place du matériau [5]. La mise en œuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir-faire particulier. La solution proposée a été d'utiliser un matériau très fluide, capable de se compacter sous son propre poids, sans vibration extérieure. Ces matériaux initialement appelés Bétons Hautes performances, sont aujourd'hui connus sous le nom de bétons autoplaçants, bétons auto-compactants, ou bétons auto-nivelants, selon les applications [5]. Ils connaissent à l'heure actuelle un essor considérable en Europe et aux Etats-Unis et prendront dans les années à venir une place de plus en plus importante. Les domaines d'application des BAP sont nombreux, mais leur utilisation implique une évolution ou une adaptation des moyens et des techniques traditionnellement employées. Il existe deux catégories de bétons fluides [5]:

Les bétons autoplaçants (BAP), employés pour un coulage vertical (voiles) peuvent atteindre des résistances beaucoup plus élevées comme celles d'un béton à hautes performances, soit jusqu'à 80MPa. Cette gamme de résistance plus étendue est obtenue en jouant sur la teneur en eau ou sur la nature des poudres (ciment et additions minérales) qui peuvent être inertes, hydrauliques ou pouzzolaniques. Les viscosités de ces bétons sont plus élevées car les rapports E/C sont relativement plus faibles que ceux des BAN. Ce qui permet d'atteindre des résistances en compression de l'ordre de ceux des BHP.

Les bétons auto-nivelants (BAN), employés pour un coulage horizontal (de dallages industriels, planchers et chapes flottantes) ont des résistances en compression équivalentes à celles des bétons ordinaires jusqu'à 40MPa, du fait des forts rapports E/C

Ce béton est moins visqueux que le béton autoplaçant et plus robuste vis-à-vis de la ségrégation, malgré une plus grande fluidité, rendue possible grâce à l'ajout d'agents viscosants (amidons, welan gum, etc.).

1.2 Caractérisation de béton autoplaçant a l'état frai

1.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams

La fluidité et la mobilité du BAP en milieu non confiné sont caractérisées par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou slump flow) [6]. Le matériel utilisé pour

réaliser cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque métallique. L'essai consiste à remplir le cône d'Abrams en une fois, puis de le soulever et de mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement obtenue (2 mesures correspondant à 2 diamètres perpendiculaires). Plus le diamètre est grand, plus le matériau est fluide. Il permet avec la norme d'essai (NF EN 12350-8) de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier.

Des valeurs de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP. L'étalement doit être défini en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre. Cet essai est utilisé pour la mise au point de la formulation du BAP.

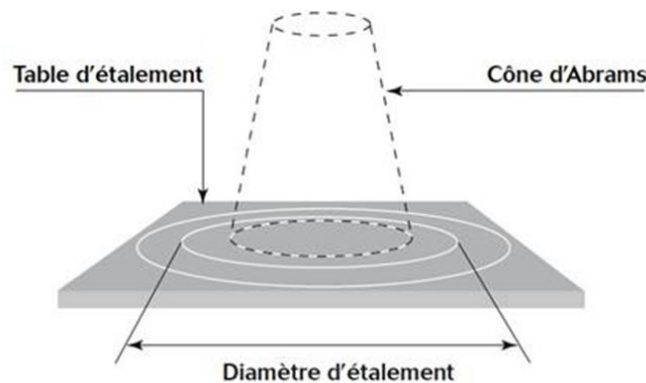


Figure 1.1. Essai d'étalement

1.2.2 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 [6]. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte 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 (ferraillage complexe : 3 barres distantes de 41 mm, ou simple : 2 barres distantes de 59 mm).

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 (ferraillage complexe : 3 barres distantes de 41 mm, ou simple : 2 barres distantes de 59 mm).

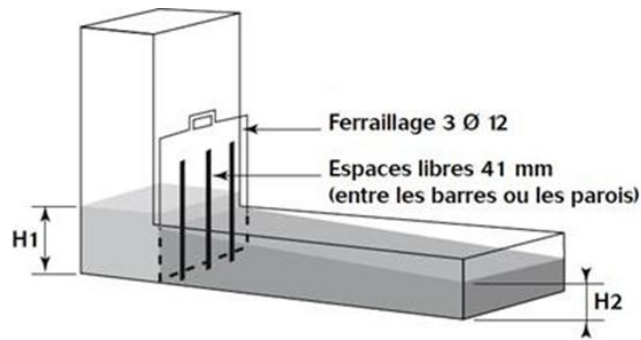


Figure 1.2. Essai de boîte en L

Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticale (H_1 côté trappe) et horizontale (H_2). Cette l'essai est la Norme d'essai : (NF EN 12350-10). 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.

1.2.3 Essai de stabilité au tamis

Cet essai permet d'évaluer le risque de ségrégation et d'étudier le ressuage du BAP, qui doit être stable et conserver une composition homogène sous l'effet de la gravité [6]. Cet essai permet l'optimisation d'une formulation de BAP. Norme d'essai : NF EN 12350-11, Il consiste à déverser une quantité de béton sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Au bout de 15 min, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis. Le pourcentage en masse de laitance passée à travers le tamis, par rapport à la masse de l'échantillon initial, exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %. Plus il est faible, plus le béton est stable. Au-delà de 20 %, le béton présente un risque de ségrégation.

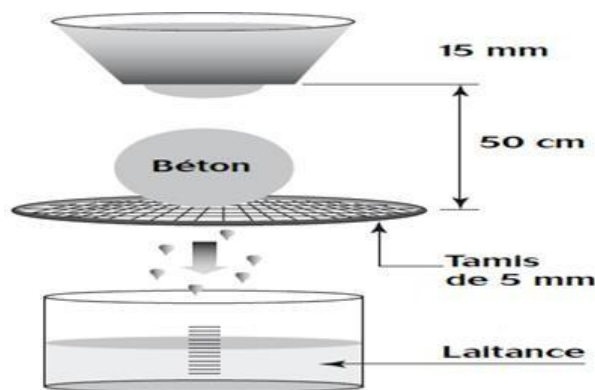


Figure 1.3. Essai de stabilité au tamis



Figure 1.4. Représentation de l'essai de stabilité au tamis

1.3 Les principaux constituants des BAP

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des BO. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Étant donné le mode de mise en place des BAP, les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques.

1.3.1 Matériaux de base

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton. Ils sont qualifiés ainsi puisqu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons de nos ancêtres et parce qu'ils ont toujours les plus grosses proportions relatives dans le mélange de BAP.

1.3.2 Les granulats

Les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Les granulats roulés en vrac présentent un plus petit volume de vide intergranulaire, ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique. masse identique. Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm. L'expérience a néanmoins montré qu'il était également possible d'utiliser des granulats de diamètre maximal différent. Le mélange pour béton (granularité) est caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins. Le passant au tamis de 2 mm devrait être idéalement compris entre 38 et 42%. De même, la proportion de farines ($\leq 0,125$ mm) ne devrait pas être trop faible, l'optimum étant situé entre 4 et 8%. Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de

pâte de ciment. Afin d'assurer une bonne stabilité du BAP (éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé. Partir de plusieurs fractions.

1.3.3 Le ciment

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de BAP. Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales.

1.3.4 L'eau de gâchage

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication de béton Autoplaçant. Les eaux recyclées de gâchage et de lavage ne conviennent que sous certaines conditions restrictives en raison d'éventuels effets indésirables sur les propriétés du béton. Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable la viscosité et la capacité d'autoplaçant du béton, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

1.3.5 Additions minérales

L'emploi des pouzzolanes minérales pour faire des mortiers et des bétons est connu depuis l'Antiquité. Ces pouzzolanes désignent un grand nombre d'additions minérales aux origines diverses, mais qui présentent tous, le fait d'être fins et de réagir en présence d'eau et de chaux. De nos jours, des quantités considérables de plusieurs types de ces additions continuent d'être utilisées. Nous présentons ci-dessous les différentes additions minérales éventuelles qu'on peut incorporer dans les compositions des BAP :

1. Les fillers calcaires
2. Les pouzzolanes naturelles
3. Le laitier de haut fourneau
4. La fumée de silice
5. Les cendres volantes.

1.3.6 Adjuvants chimiques

Afin d'obtenir une très grande fluidité requise d'un béton autoplaçant utilise généralement un adjuvant fluidifiant de la dernière génération, base de polycarboxylates. Ces adjuvants permettent de réduire de manière importante le dosage en eau tout en ayant également un effet sur la viscosité. L'efficacité d'un adjuvant peut être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés (compatibilité). De plus, un dosage élevé en adjuvant retarde généralement le début de prise. L'utilisation d'un adjuvant stabilisateur permet de réduire le risque de ségrégation du BAP (ressuage, granulats grossiers coulant vers le bas), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C éq. Dans chaque cas, il convient donc de sélectionner les adjuvants les mieux appropriés à un ciment donné au moyen d'essais préliminaires sinon, il faut s'attendre à devoir recourir à des dosages. Levés en adjuvants, voire à l'apparition d'un raidissement prononcé. Avec perte des performances recherchées du BAP.

1.3.7 Les superplastifiants

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée. Les plus couramment utilisés sont les sels de sodium ou de calcium du polynaphtalène sulfoné, et les sels de sodium de la polymélamine sulfonée. Les copolymères acrylate-ester ou polyacrylates ont récemment été introduits sur le marché [7].

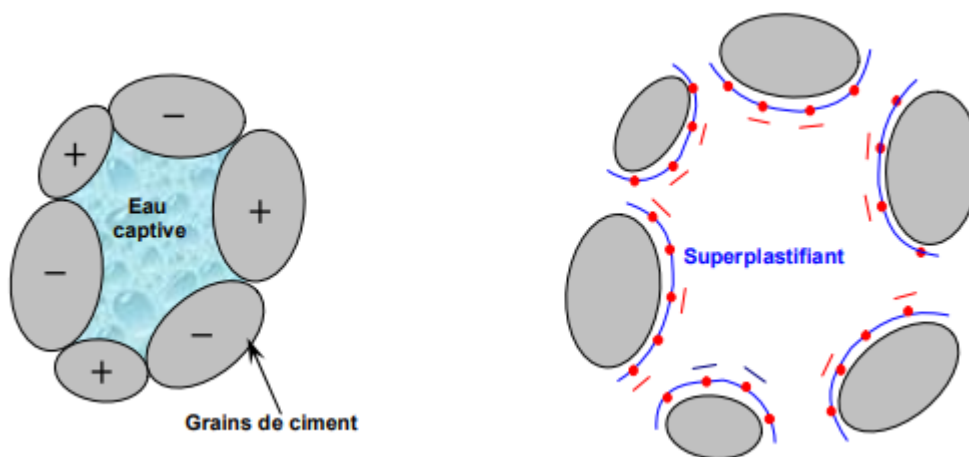


Figure 1.5. Pâte de ciment non adjuvannée et pâte de ciment adjuvannée

Le mode d'action des superplastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit: Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui présentent un grand nombre de charges opposées (positives et négatives) sur leur

surface, tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton. Les superplastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libère - de l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité.

1.3.8 Les agents colloïdaux

En 1977, des agents colloïdaux améliorant la viscosité et la stabilité du béton ont été développés en Allemagne. Ces adjuvants, se présentant généralement sous forme de poudre, sont fréquemment utilisés pour empêcher le délavement à l'état frais des bétons coulés sous l'eau, comme agent de pompage, et pour améliorer la cohésion de mélange des BAP. Leur utilisation commence à être populaire, mais ils sont actuellement relativement chers comparés aux autres adjuvants. La plupart des agents colloïdaux sont composés d'éther de cellulose ou de polymères de type acrylique qui sont solubles dans l'eau. Ils sont classés selon leur origine en trois catégories [8]. Ils comprennent des gommes naturelles, des protéines de certaines plantes et l'amidon. b. Polymères semi-synthétiques : Ils comprennent des dérivés de l'amidon, des dérivés de l'éther de cellulose comme l'hydroxyle de cellulose, l'hydroxyle de méthyle de propyle de cellulose et le méthyle carboxyle de cellulose, ainsi qu'un électrolyte comme de l'aligone de sodium. Eau captive Grains de ciment Superplastifiant - c. Polymères synthétiques : Ils comprennent de l'éthylène comme de l'oxyde de polyéthylène et de vinyle comme l'alcool de polyvinyle. Le mécanisme d'action des agents colloïdaux est fonction du type et de la concentration des polymères. Il peut être décomposé en trois phases:

- Adsorption : Les longues chaînes de polymères adhèrent à la périphérie des molécules d'eau par un phénomène d'adsorption et fixation d'une partie de l'eau. La quantité d'eau adsorbée dépend de la longueur des polymères et de leur surface spécifique.
- Association : Les molécules des chaînes de polymères adjacentes peuvent développer entre elles des forces d'attraction qui bloquent les mouvements de l'eau et provoquent la formation d'un gel qui augmente conséquemment la viscosité.
- Entrelacement : Les chaînes de polymère peuvent s'entrelacer et s'emmêler spécialement dans des mélanges à forte concentration d'agent colloïdal. Cet entrelacement

augmente la viscosité.

1.3.9 Autres additions

En plus des additions minérales indispensables caractérisant la composition de la pâte de ciment du BAP, les additions inertes suivantes sont aussi parfois utilisées:

- les pigments pour la coloration d'éléments architectoniques
- les fibres d'acier comme armature constructive
- les fibres de polyéthylène (fibres PE) pour améliorer la résistance au feu
- les fibres de polyéthylène ne (fibres PP) pour empêcher les fissures de retrait plastique.

1.4 Formulation du BAP

Le défi à relever lors de la formulation d'un BAP consiste à obtenir un béton fluide qui ne ségrége pas, qui offre une bonne rhéologie et une viscosité adaptée et qui permet la réalisation de parements de qualité. Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler sous leur propre poids avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (sans vibration) à travers des zones confinées (armatures, coffrages de formes complexes) en présence d'obstacles et se mettre en place dans des coffrages de grande hauteur [6].



Figure 1.5. Pompage de béton autoplaçant

Ils doivent être stables sous l'effet de la gravité au cours de l'écoulement et dans les phases précédant la prise et le durcissement et aussi pouvoir être mis en œuvre par pompage. Le principe de formulation vise à réduire le seuil de cisaillement du béton en lui conservant une viscosité suffisante pour éviter tout risque de ségrégation et de ressuage. Formuler un BAP consiste donc à concilier des propriétés a priori contradictoires : fluidité, stabilité, résistance à

la ségrégation « dynamique » (cheminement dans des zones ferrillées) et à la ségrégation « statique » (pas de ressuage, pas de tassement) une fois le béton en place (la suspension des divers grains qui le constituent doit rester homogène jusqu'à la prise du matériau) [6].

Les études d'optimisation de la formulation des BAP ont pour objectif d'obtenir une formule fiable et robuste facilement contrôlable sur chantier. Pour ce faire, les cinq principes fondamentaux suivants doivent être respectés :

- Fluidification de la pâte : cette fluidification est obtenue sans ajout d'eau par utilisation de superplastifiants à fort pouvoir défloculant ;
- Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement et la fluidité ;
- Augmentation du volume de pâte et diminution du D_{max} des granulats (D_{max} compris entre 10 et 16 mm) ;
- Stabilisation du mélange pour éviter le ressuage et les risques de ségrégation ;
- Maintien de la rhéologie pendant la durée pratique d'utilisation souhaitée.

Chapitre 2 :

Utilisation des déchets comme sable

2.1. Introduction :

Un déchet est un objet en fin de vie ou une substance ayant subi une altération physique ou chimique, qui ne présente alors plus d'utilité ou est destiné à l'élimination. Leur classification peut notamment se faire en fonction de leur état physique (solide, liquide, gazeux), de leur provenance (déchets ménagers, déchets industriels, déchets agricoles), de leur traitement (primaires, secondaires, ultimes) ou encore de leur dangerosité (déchets inertes, déchets banals, déchets spéciaux).

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Sont considérés comme déchets toutes substances mise en rebut, ou tout produit qui doit être jeté car il est usé, contaminé ou abîmé [09].

2.2. Granulats

On appelle granulats, tout matériau inerte qui entre dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm, les granulats vont des fillers, sables, graviers, aux cailloux. La provenance des granulats peut être naturelle, de transformation (artificielle) et pour ces dernière années de recyclage. On distingue quatre catégories de granulats en fonction de leur provenance :

- Les granulats d'origine alluvionnaire ; ils sont considérés comme roulés, ou semi concassés ;
- Les granulats de roches massives ; appelés aussi granulats concassés ;
- Les granulats de transformation ayant subis des transformations physico-chimiques ;
- Les granulats de recyclage.

2.2.1. Provenance des granulats

2.2.1.1. Granulats alluvionnaires :

Les gisements les plus habituels sont les lits de rivières déposés par les cours d'eau et les fonds marins. En fonction de la situation du gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique de l'endroit, l'exploitation a lieu soit à sec ou dans l'eau. La forme de ces granulats est roulée. Cette forme est acquise par l'érosion. Ces granulats sont criblés (séparés) en différentes classes granulaires. On peut distinguer :

- Sables et graviers alluvionnaires fluviatiles : siliceux ou silico-calcaires déposés par les cours d'eau pendant l'ère quaternaire. Ils sont exploités tout au long du réseau hydrographique.
- Alluvions marines : exploitées entre 10 et 30 mètres de profondeur sur le plateau continental. Ces granulats ne sont immergés que depuis quelques milliers d'années par suite de la remontée du niveau marin après la dernière glaciation (époque actuelle). En réalité, il s'agit d'anciennes alluvions fluviatiles et littorales.
- Couches de sables ou de sablons, roches sédimentaires non consolidées : déposées il y a des millions d'années.

2.2.1.2. *Granulats de roches massives :*

Les gisements de roches massives (carrières) correspondent à une multitude de situations géologiques (couches plus ou moins épaisses, filons, épanchements volcaniques, massifs de granite...) et à des localisations géographiques très différentes. La carrière peut être implantée en plaine sur un plateau ou en montagne au bord d'une falaise. L'exploitation s'effectue à flanc de coteau ou en puits, en fonction de la situation du niveau géologique utile. On peut ainsi extraire et produire des granulats avec des roches éruptives, des roches métamorphiques et des roches sédimentaires consolidées (calcaires...). Ces granulats sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré-criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent de l'origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage... On peut distinguer :

- Roches sédimentaires consolidées telles que les calcaires ou les degrés. On les exploite dans les bassins sédimentaires et dans les régions montagneuses.
- Roches métamorphiques dures telles que les quartzites ou les gneiss. Elles affleurent plus particulièrement dans les massifs montagneux anciens.
- Roches éruptives anciennes. Il s'agit de roches plutoniques à cristaux plus ou moins développés (granites, diorites, micro-diorites, gabbros...) ou de roches volcaniques (rhyolites...), exploitées dans les massifs montagneux anciens avec une répartition géographique analogue à celle des roches.

- Roches volcaniques récentes telles que le basalte, le trachyte ou l'andésite ; roches épanchées par le volcanisme récent du massif Central.

2.2.1.3. Granulats de transformation :

Les granulats de transformation sont souvent d'origine minérale résultant d'un procédé de transformation industriel comprenant des modifications thermiques (cuisson) ou chimiques. Dans cette catégorie se rangent les granulats légers transformés, comme l'argile expansée et le schiste expansé.

La cuisson à des températures allant de 1000 à 1200 °C, dans un four rotatif, de nodules d'argile ou de schiste produit d'une part un dégagement gazeux au sein de chaque nodule sous l'effet de réactions chimiques, ce qui entraîne l'expansion du nodule, d'autre part une vitrification de la couche externe. On obtient alors un granulats plus gros, avec une grande porosité, donc plus léger.

2.2.1.4. Granulats de recyclage :

L'emploi des déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats. Dans la partie 2 de ce présent chapitre nous avons définis d'une manière plus approfondie le recyclage dans la construction et les différentes possibilités de granulats de recyclages et les inconvénients et les intérêts de chacun dans la construction.

2.2.2. Propriétés des granulats

Les propriétés des granulats sont intimement liées aux propriétés du massif rocheux d'origine, c.-à-d. la composition chimique et minéralogique, les caractéristiques pétrographiques, la densité, la dureté, la résistance, la stabilité physique et chimique, la structure des pores et la couleur. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèque qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci [4, 5]. D'après leur nature minéralogique, on distingue trois grandes classes :

- Les granulats siliceux ;
- Les granulats calcaires ;
- Les granulats granitiques (argileux ou schisteux)

- Par Les granulats ont des effets sur les propriétés mécaniques et sur la consistance du béton de plusieurs manières [10, 11, 12] : leur capacité d'adhérence à la pâte liante (pâte de ciment durcie);
- Par leur forme (roulés, concassés et semi-concassés);
- Par leur distribution granulaire et donc la compacité du mélange granulaire formé ;
- Par leur diamètre maximal, et leur volume par rapport au volume total du béton.

Dans une composition de béton, la dimension des granulats à utiliser passe des micromètres à quelques centimètres. La dimension maximale est variable, elle dépend du confinement des armatures et des dimensions des coffrages. On trie les granulats par dimension au moyen de tamis (mailles carrées) et de passoirs (trous circulaires). Les principales classes granulaires caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats sont (Norme XP P 18-540):

- Fillers 0/D \Rightarrow pour $D < 2$ mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm.
- Sablon 0/D \Rightarrow pour $D < 1$ mm et avec moins de 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm
- Sable 0/D \Rightarrow Pour $1 \text{ mm} < D \leq 6,3$ mm ;
- Gravies 0/D \Rightarrow Pour $D > 6,3$ mm
- Gravillons d/D \Rightarrow Pour $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm
- Ballast d/D \Rightarrow Pour $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm



Figure 2.1. Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton [10, 11, 12]

Module de finesse : Pour confectionner un béton de qualité, on utilise au moins deux classes de granulats différentes. Les principales divisions comprennent le sable et le gros granulat, dont les éléments mesurent au moins 5 mm de diamètre. Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. - S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton ; - Si le sable est grossier, la plasticité du béton sera réduite et sa mise en place sera difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par son module de finesse (**MF**). Celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis (0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5).

La valeur du MF est d'autant plus élevée que le granulat est grossier. Un bon sable à béton doit avoir un MF d'environ 2,2 à 2,8. En dessous de 2,2 le sable a une majorité d'éléments fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Au-dessus de 2,8 le sable manque de fines et le béton perd en ouvrabilité [13, 10].

La quantité de pâte de ciment fraîche à introduire dans le béton doit être suffisante pour recouvrir la surface de tous les grains de sorte que, plus la surface spécifique des granulats est faible, moins il faut de pâte et conséquemment, plus la demande en eau est faible

a. Forme et texture des granulats :

La forme et la texture ont des effets sur la compacité du béton à formuler, et donc sur l'ouvrabilité et maniabilité du béton. La texture de la surface des granulats affecte sa liaison avec la pâte de ciment et influence la demande en eau du mélange. La forme en aiguille ou plate, mais aussi les granulats très anguleux sont à éviter, car elle nécessitent une quantité d'eau plus élevée, pour une même maniabilité du béton, ce qui peut nuire à la qualité du béton et peut provoquer des défauts d'aspect. La forme et la texture des granulats influencent :

- La demande en eau
- La maniabilité : facilité de mise en œuvre et le compactage du béton.
- La compacité
- du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.
- L'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

b. Propreté :

les granulats utilisés dans le béton doivent être propres, débarrassés de tous corps polluants

qui peuvent nuire à l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats et provoquer une fissuration précoce du béton [13, 10]. La propreté désigne d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains, traces dues à la présence d'oxyde de fer, pyrite, argile... Un granulats propre ne laisse pas de traces. D'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes. Les granulats ne doivent pas contenir d'hydrocarbures, d'huiles végétales ou de matière organique. Les granulats doivent être exempts de sulfures sous forme de pyrites, de sulfates et de chlorures qui nuisent aux propriétés de durabilité du béton durci.

Il existe plusieurs essais de laboratoire pour le contrôle de la propreté des granulats :

- Essai de la perte au feu
- Essai d'équivalent de sable « ES »
- Tests chimiques ; les composants chimiques à utiliser dépendent du produit recherché.

Exemple de l'essai au bleu de méthylène qui permet de déterminer la teneur en argile du Sable : les fines d'origine argileuse retiennent le bleu de méthylène.

Les fines selon la norme NF P 18-540 désignent les particules passant au tamis de 0,08 mm. Les fines peuvent provenir du sable, des gravillons et d'additifs divers. Dans le sable et gravillon concassé, leur pourcentage peut être élevé. Un excès de fines nécessite un dosage en eau plus élevé, mais un manque de fines conduit à des bétons peu maniables et de faible compacité. Leur nocivité est grande lorsqu'elles contiennent des matières argileuses, c'est pourquoi il faut les tester au bleu de méthylène.

c. Propriétés mécaniques des granulats :

En plus des propriétés de résistance à la compression, cisaillement, traction..., les granulats sont testés vis-à-vis de la résistance à l'usure et au choc donc à l'écrasement. Pour certains usages les granulats peuvent également être caractérisés vis-à-vis de l'action du gel dégel et des températures d'usages très élevées.

2.3. Valorisation des déchets comme granulats :

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des fleuves et mers. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. Il s'agit de produits nobles

dont l'utilisation pourrait, par exemple, être en tout ou partie remplacée par des granulats recyclés pour la production de différents types de bétons. Comme toute matière première naturelle, les granulats naturels sont limités en quantité et leur extraction n'est pas sans impact sur la faune et la flore, on constate d'ailleurs que les critères d'exploitation deviennent plus stricts [14]. L'utilisation des granulats naturels doit être réservée à des usages plus nobles pour lesquels aucune alternative n'existe.

2.3.1. Béton démolie :

Le recyclage des matériaux de démolition répond aux soucis de préserver ou d'économiser les granulats naturels pour les besoins de fonctionnement des chantiers. La majorité des applications de granulat recyclés issus de produits de démolition trouvent essentiellement des débouchés dans le domaine routier, mais une meilleure connaissance du comportement des bétons incluant de tels granulats peut contribuer au développement de cette application [13,15]. Les matériaux de démolition peuvent constituer une alternative économique et écologique intéressante.

De nombreux travaux de recherches qui traitent l'effet de substitution des granulats naturels par des granulats issus des bétons de démolition pour la fabrication de béton hydraulique ont été publiés. La figure 2.2. montre la variation de l'étalement en fonction du temps pour différents taux de substitution de sable par des granulats de béton (GB) [16]. Les résultats obtenus montrent une nette diminution de l'étalement avec le remplacement du sable naturel par GB. Cependant, le taux de réduction est plus important pour des taux de remplacement les plus élevés (50 et 100%). Il a été conclu que le mélange de référence et le mélange à base de 20% de GB présentent un comportement à peu près similaire, alors que les mélanges à base de 50 et 100% de GB montrent de fortes réductions particulièrement après 45 min ce qui entraînent une perte des caractéristiques du SCC (étalement < 550 mm [17]).

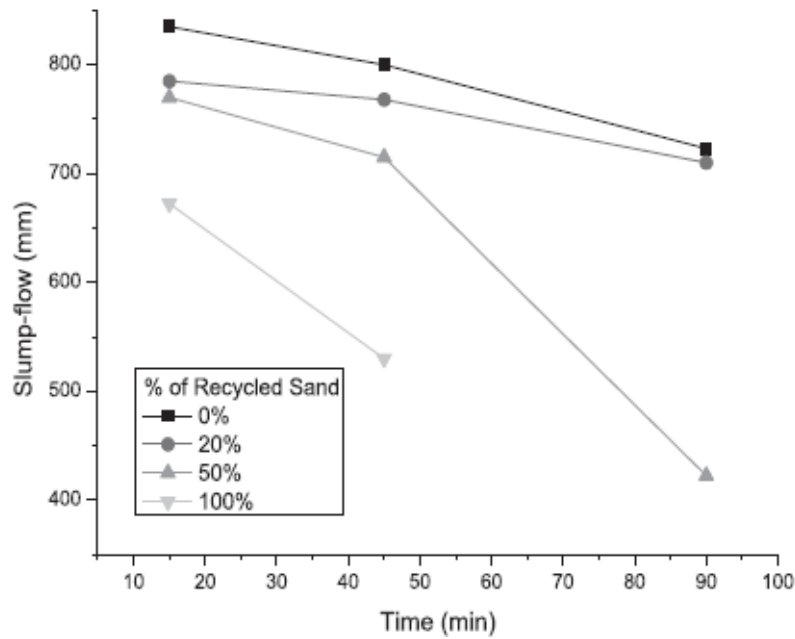


Figure 2.2. Variation de l'étalement en fonction du temps pour différents taux de substitution de sable par granulat de béton. [16]

2.3.2. Déchets de brique :

Les déchets de briques sont générés par l'industrie des produits rouges ou obtenus suite aux opérations de réalisation ou de démolition des constructions. Leur quantité est en croissance à cause de la grande consommation de brique et au nombre élevé de briqueteries qui rejettent ce que représente 10 à 15 % de leurs productions (briques non conformes, déformées et cassées) [18]. Plusieurs études ont montré la possibilité d'utilisation des déchets de brique comme poudre ou granulats pour la production du béton. Bourmatte [19] a conduit un travail expérimental en vue d'étudier les caractéristiques des bétons hydrauliques à base de granulats recyclés. La figure 2.3 présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers à 2, 7 et 28 jours en fonction de différents taux de substitution de sable de brique. La résistance diminue avec l'augmentation de la quantité de sable de brique. Un mortier à base de déchets de brique M25 présente les meilleures résistances à la compression (identiques à celles du mortier normal). Bektas et al [20] ont étudié l'effet du sable de brique concassé sur la durabilité vis-à-vis des cycles gel-dégel. Les auteurs ont observé une réduction de l'expansion avec l'augmentation du taux du sable de brique concassé.

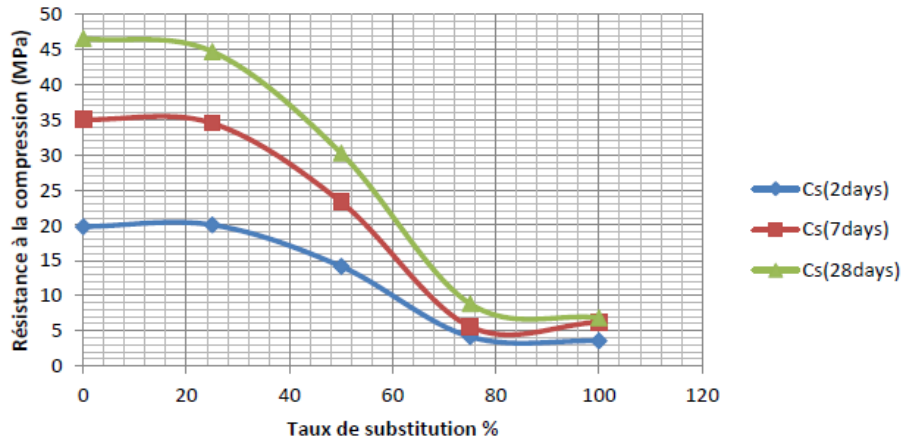


Figure 2.3. Influence du taux de substitution de sable de brique sur la résistance à la compression des mortiers. [20]

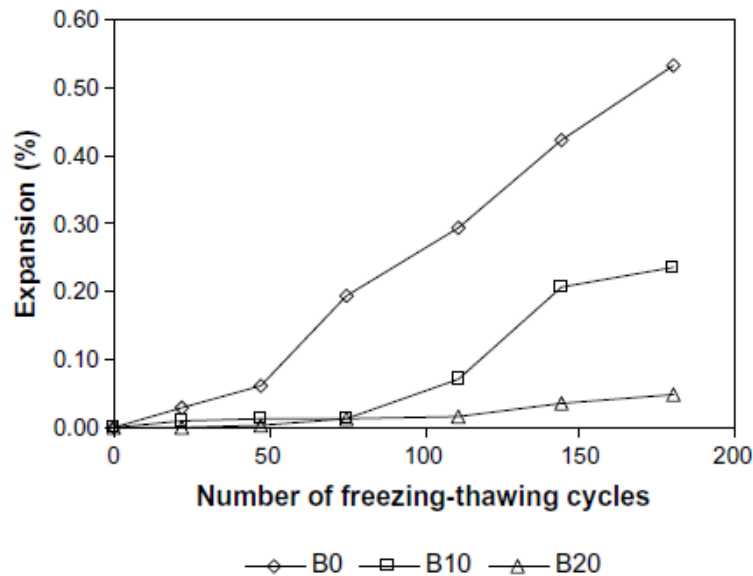


Figure 2.4. Variation de l'expansion des mortiers en fonction du taux de substitution de sable de brique. [20]

2.3.3. Déchets de marbre :

L'industrie de marbrerie génère annuellement de la quantité de déchets importants. Ces déchets résultent des opérations de sciage, façonnage et lustration de la pierre de marbre [21]. Cette pierre naturelle d'origine calcaire met des années pour sa formation. Elle est caractérisée par sa beauté, sa grande variété et son aspect lisse et brillant qui font d'elle l'une des roches les plus nobles que puisse exister. Chaque marbre a son originalité de par sa composition et de par de ses couleurs. Le marbre est couramment utilisé pour fabriquer des objets esthétiques aussi bien pour les maisons (revêtements muraux, des dallages, éléments sanitaires), les jardins publics que pour l'aménagement des voies.

Lorsque la pierre de marbre est transportée de la carrière de marbrier vers l'usine, elle est découpée en de petites pierres dépendant des dimensions recherchées. Ces petites pierres sont ensuite façonnées et lustrées de telle manière à obtenir la taille et l'aspect souhaités. Pendant ces opérations une quantité importante de marbre qui représente presque 20% à 30% de la matière première est perdue et souvent rejetée dans la nature [22].

L'utilisation de ces déchets est très nécessaire, d'une part pour éviter la pollution de la nature et d'autre part pour protéger et conserver les ressources naturelles fortement consommées par l'industrie de béton. Le recyclage des déchets de marbre dans la fabrication des bétons est très avantageux en termes de coût, de durabilité et d'écologie [23]. Dans leur travail, Aruntas et al. [24] ont examiné l'effet de substitution de déchets de marbre par 10% par rapport au ciment et au sable sur la résistance à la compression. Ils ont conclu que la substitution sable naturel par 10% déchets de marbre est plus bénéfique sur le plan de résistance.

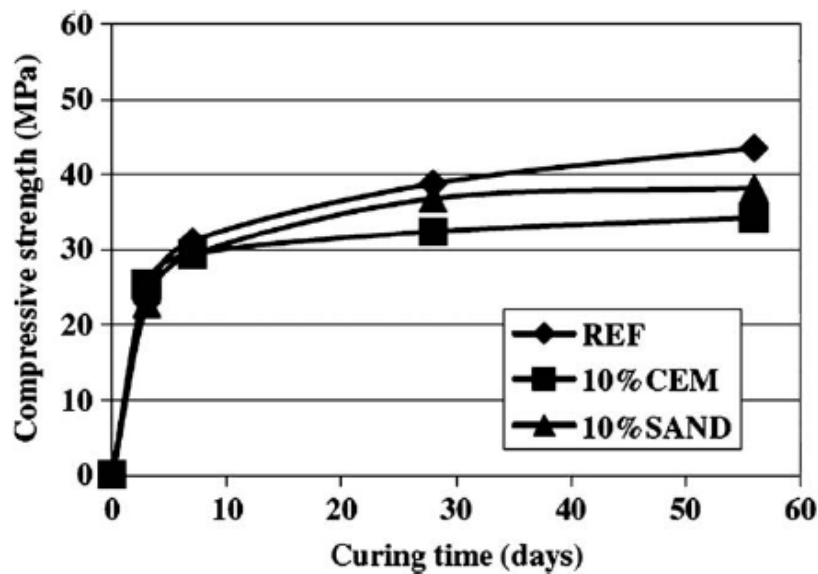


Figure 2.5. Influence de substitution du sable et du ciment par 10% de poudre de marbre sur la résistance à la compression [24].

2.3.4. Déchets de granite :

Le granite est une roche magmatique très dure constituée de silicates (quartz, feldspath et mica de 75%), d'alumine (15%) et d'autres oxydes métalliques (10%) [20]. La pierre de granite est caractérisée par sa solidité, son imperméabilité et ses différentes textures et coloris. Ce matériau résistant est utilisé comme matériaux de construction dans les

revêtements des trottoirs, les dallages, les éléments de décoration, les éléments sculptés, et comme agrégat pour la fabrication de béton.

Cette pierre décorative et ornementale a été à un temps n'est pas loin importée, ce qui augmente la facture d'importation. A l'heure actuelle, la pierre de granite est disponible en Algérie, exactement à Tamanrasset qui compte trois gisements qui sont déjà exploités dont le plus grand est celui situant à Silet. Ces gisements disposent de granite en grande variété avec des textures et coloris diverses (noir, gris et rose).

L'industrie de granite génère également des quantités importantes de déchets qui sont issus des opérations de coupage, polissage et lustration de la pierre de granite. Leur non exploitation peut constituer des problèmes environnementaux et humains liés à la pollution de l'air et à la contamination de l'eau [25].

2.3.5. Déchets de céramique :

La céramique est un matériau constitué d'argile et des aluminosilicates provenant des feldspaths. Le mélange de ces matériaux et son traitement à haute température permet de fabriquer des pièces solides, réfractaires et durables souvent utilisée dans les maisons et les bâtiments comme éléments d'ornements et appareils sanitaires. Senthamarai et Manoharan [26] ont rapporté que la production journalière de céramique génère environ 30% de déchets dont leur non utilisation pose un gros problème environnemental lié à leur dépôt.

Plusieurs travaux de recherches ont été menés afin d'étudier la possibilité d'utilisation de déchets de céramique comme granulats pour remplacer les granulats naturels ou comme filler pour substituer partiellement le ciment [27-28]. L'effet de substitution du sable et gravier naturels par différents pourcentages de déchets de céramique (25, 50, 75 et 100%) sur l'affaissement du béton a été examiné par Awoyera et al [29], les résultats sont montrés sur la figure 2.6. Les auteurs ont constaté une légère diminution de l'affaissement avec l'incorporation de déchets de céramique jusqu'à 75%. Par contre la substitution totale du sable et gravier naturels par de déchets de céramique cause une réduction remarquable de l'affaissement.

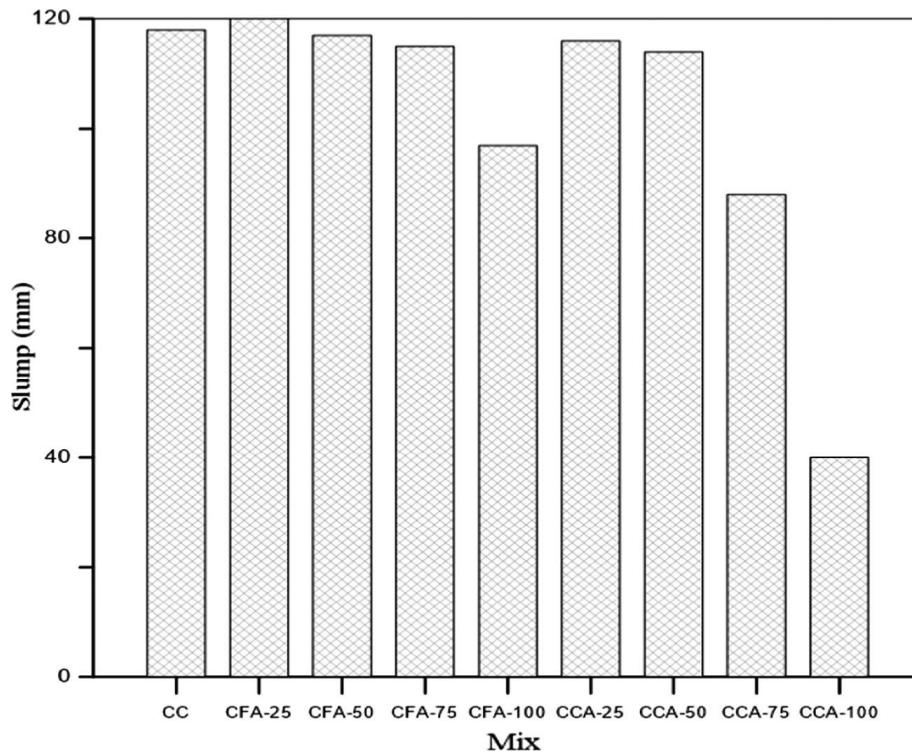


Figure 2.6. Effet de substitution du sable et gravier naturels par différents pourcentages de déchets de céramique sur l'affaissement du béton. [29]

2.3.6. Déchets de plastique :

Les déchets en matières plastiques représentent une part importante des déchets solides municipaux. De plus, ils posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie et parce que ce sont des déchets voyants. Leur gestion est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. Un travail vise à été mené pour étudier la possibilité d'utiliser des déchets de bouteilles plastiques (PET-polyéthylène téréphtalate) et des citernes (PEBD -polyéthylène bas densité) dans le béton sans autre transformation que le broyage, afin de minimiser le coût du matériau final [30]. L'influence de la proportion des déchets utilisés sur les caractéristiques physiques et mécaniques du nouveau matériau été étudiée et analysée. L'analyse des résultats issus de l'essai d'absorption d'eau (figure 2.7) montre que l'augmentation du taux des grains de plastiques entraîne une diminution de la quantité d'eau absorbée ce qui permet de fabriquer des bétons plus durable.

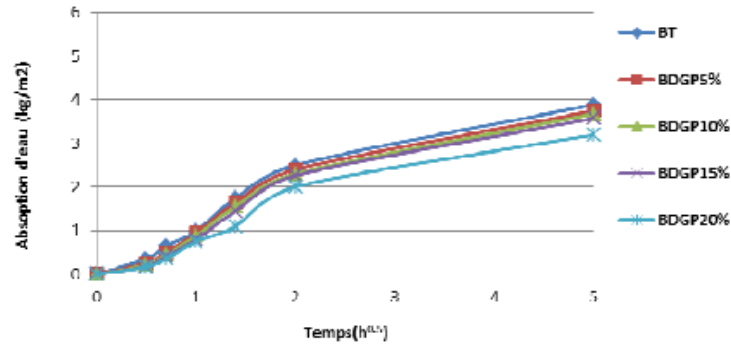


Figure 2.7. Effet des grains de plastique sur l'absorption d'eau du béton. [30]

2.3.7. Déchets de verre :

Une quantité importante de déchets de verre est annuellement jetée par les usines de production des éléments en verre (panneaux, miroirs, tubes et bouteilles), les ateliers de verrerie et les habitants. Ces déchets posent des problèmes multiples à savoir l'aspect dangereux lié à leur collectage par les agents de propreté, et la détérioration de l'environnement liée à leur dépôt. Si ces déchets sont traités et ensuite broyés à une poudre fine, il est possible d'envisager leur utilisation comme un matériau cimentaire ou remplissage pour remplacer partiellement ou totalement le ciment Portland et les granulats. Dans une étude récente [31], l'effet de granulats de déchets recyclés sur la résistance à la compression de béton a été traité. Les résultats montrent une diminution de la résistance à la compression à tous les âges avec l'incorporation de déchets de verre. Pour les bétons à 25% de sable de déchets de verre, la perte de résistance à la compression reste pratiquement stable au jeune âge et à 28 jours, elle est de l'ordre de 24%. Pour les bétons à 50% de sable de déchets de verre la perte de résistance à la compression commence par 41% à jeune âge et arrive à l'ordre de 51% à 28 jours. Ceci est probablement dû à la nature fragile du matériau verre.

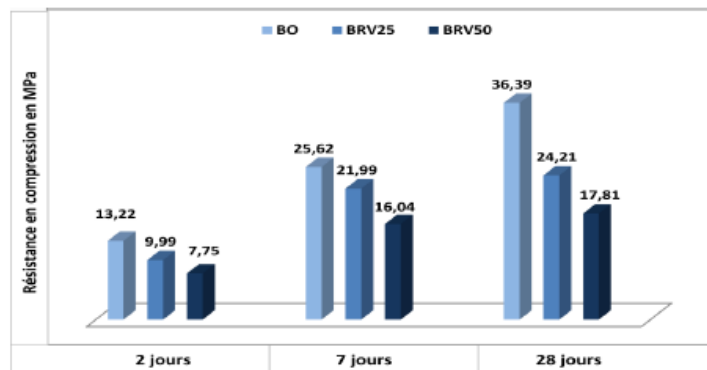


Figure 2.8. Développement de la résistance à la compression des bétons à base de déchets de verre en fonction du temps. [31]

2.3.8. Déchets de caoutchouc :

Le recyclage des déchets du caoutchouc issus des pneus a une grande importance du point de vue environnemental, car ces derniers produisent chaque année d'important flux de déchet, ils représentent une réelle problématique quand on sait qu'un pneu met 400 ans avant de commencer à se dégrader. L'emploi de ces déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats. Plusieurs travaux de recherches qui étudient l'effet de d'utilisation de déchets de caoutchouc comme granulats dans ont été publiés. La figure 2.9 montre l'incorporation de déchets de caoutchouc conduit à des bétons plus léger [32]. Il a été constaté que l'augmentation du pourcentage de déchets de caoutchouc mène à une diminution quasi linéaire de la résistance à la compression (figure 2.10).

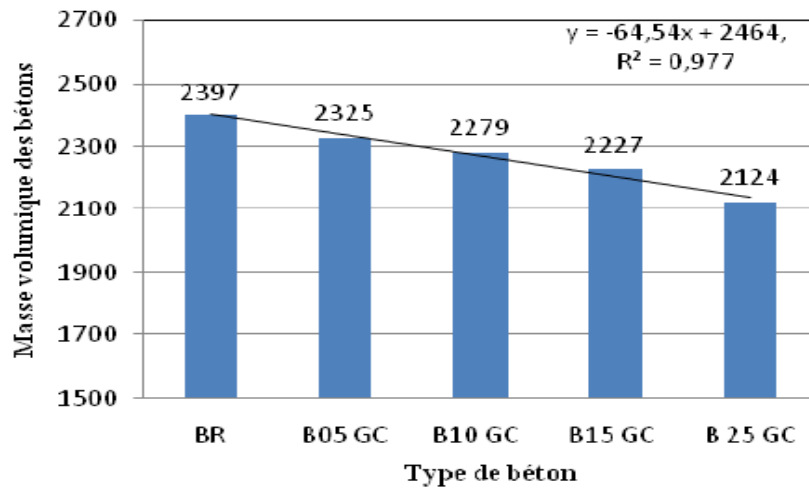


Figure 2.9. Masse volumique des bétons en fonction du pourcentage en granulats de caoutchouc. [32]

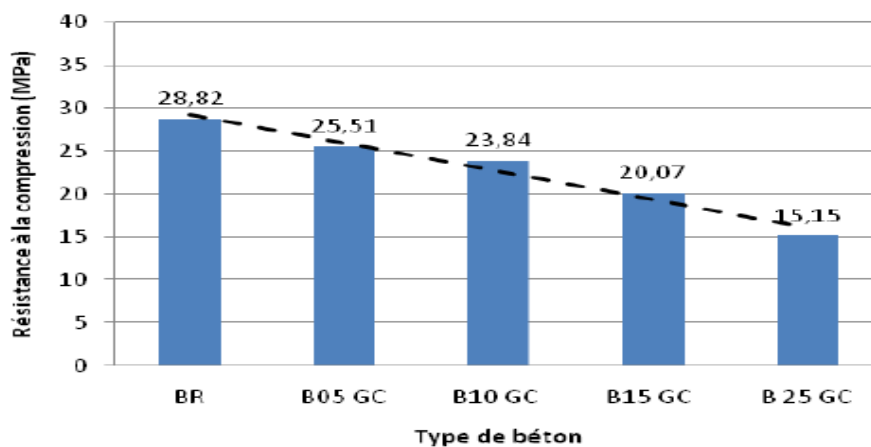


Figure 2.10. Résistance à la compression des bétons en fonction du pourcentage en granulats de caoutchouc [32]

2.3.9. Laitier de hauts fourneaux :

Des sollicitations d'ordre économique et surtout écologique de ces dernières années ont rendu nécessaire la valorisation des déchets industriels. Les laitiers de haut fourneau constitue un exemple de ces déchets puisque qu'ils sont des coproduits de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux (laitier granulé et laitier cristallisé). Ces produits existent en quantité importante sous forme de terrils qui sont venus modifier les paysages et déranger l'environnement [33]. Le laitier granulé est utilisé comme liant grâce à son hydraulité [34], dans la fabrication de matériaux pour assises routières (graves laitiers). Le laitier cristallisé étant utilisé après concassages et criblages comme granulats dans la fabrication de matériaux d'assises de chaussées (grave laitier tout laitier).

L'influence de la substitution du sable naturel par du sable de laitier (10, 20, 30, 40, 50 et 60%) sur le retrait et les propriétés mécaniques de béton autoplaçant a été investigué par Valcuende et al [35]. Les résultats sont présentés dans la figure 2.11 et le tableau 2.1. Il a été noté une augmentation du retrait avec l'introduction du sable de laitier. En ce qui concerne les propriétés mécaniques, une légère diminution de la résistance a été observée à 7 et 28 jours, par contre légère augmentation de la résistance a été notée à 90 et 365 jours particulièrement pour les mélanges contenant plus de 20% de laitier.

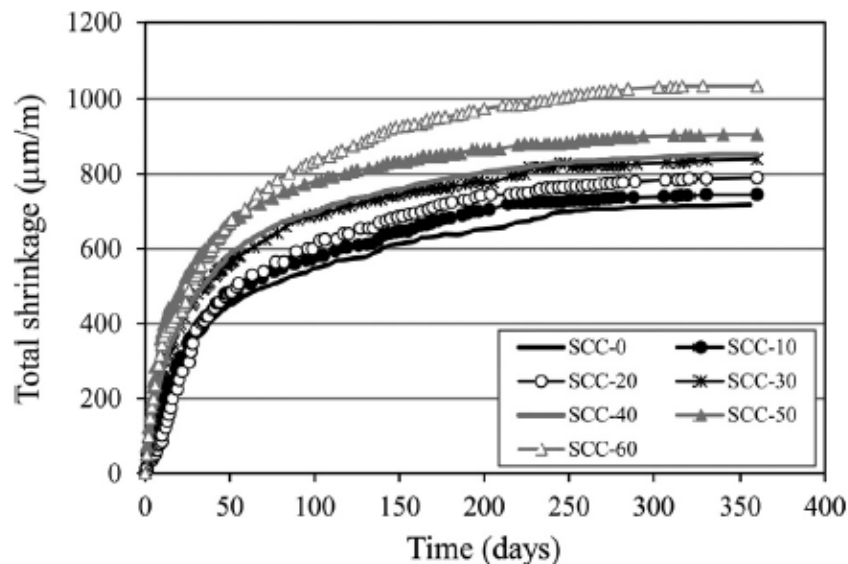


Figure 2.11. Variation du retrait total en fonction du temps pour différents pourcentages de substitution de sable de laitier. [35]

Tableau 2.1. Propriétés mécaniques des bétons à base de sable de laitier. [35]

| Mélanges | Résistance à la compression (MPa) | | | | Module d'élasticité à 28 jours (GPa) |
|----------|-----------------------------------|----------|----------|-----------|---|
| | 7 jours | 28 jours | 90 jours | 365 jours | |
| BAP-0 | 33,00 | 39,20 | 46,70 | 49,60 | 30,54 |
| BAP-10 | 31,00 | 38,90 | 46,50 | 49,20 | 29,01 |
| BAP-20 | 34,00 | 38,70 | 46,70 | 49,70 | 29,40 |
| BAP-30 | 32,80 | 39,20 | 47,50 | 51,10 | 28,75 |
| BAP-40 | 31,20 | 38,90 | 45,50 | 50,90 | 28,44 |
| BAP-50 | 31,30 | 38,20 | 48,70 | 51,80 | 28,80 |
| BAP-60 | 29,90 | 38,70 | 52,30 | 28,65 | 28,65 |

Chapitre 3 :

Caractérisation des matériaux, formulation et protocole d'essais

3.1. Introduction :

L'évaluation des propriétés des pâtes, mortiers et bétons aux états frais et durci nécessitent une bonne connaissance des propriétés physico-mécaniques, thermiques et chimiques de différents matériaux qui leur composent. Pour cela, nous nous intéressons en premier temps à la caractérisation des matériaux entrant dans la composition de différents mélanges, particulièrement les trios sable utilisés (sable alluvionnaire, sable de kaolin, sable de laitier). On passe ensuite à la description de la méthode de formulation du béton autoplaçant. Enfin, on procèdera à la réalisation des essais relatifs aux mortiers frais et aux bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci.

3.2. Caractérisation des matériaux

3.2.1. Sable

Dans cette étude, nous avons utilisé trois types de sable : sable alluvionnaire, sable de kaolin, sable de laitier.

3.2.1.1. Sable alluvionnaire

Ce sable siliceuse, est disponible en abondance dans la wilaya de Laghouat. D'après les résultats de l'analyse granulométrique (Figure 3.1), ce sable naturel de classe granulaire 0/5, présente une granulométrie continue et étalée qui sont recommandées pour la production des bétons de bonnes qualités. Les propriétés physiques du sable sont présentées dans le tableau 3.2. La valeur de l'équivalent de sable montre que le sable utilisé est très propre, signe d'absence presque totale des fines argileuses. Le module de finesse obtenu est de 2,02, cette valeur s'inscrit dans les limites (1,8 et 3,2) préconisées pour les sables destinés à la composition du béton de structure.

3.2.1.2. Sable de Kaolin

Le kaolin est une argile blanche appelé le kaolin. Il est extrait depuis la mine, ensuite il subit un traitement pour le rendre pur. Le kaolin traité est utilisé comme matière première dans les industries de la céramique sanitaire, des carreaux mural et de sol, de la vaisselle, des réfractaires, des matériaux ignifuges, du caoutchouc, des peintures, des papiers et colles [36] Le kaolin est aussi utilisé dans le domaine de la médecine et plus précisément la médecine dentaire comme pâte dentifrice.

A l'échelle mondiale, le matériau kaolin est disponible dans nombreux pays et régions à savoir le sous-continent indien, l'Asie du Sud-Est, la Chine, l'Amérique de Sud, l'Amérique

de Nord, l'Australie et d'autres pays Européens [37] , [38] .En Algérie, le kaolin se trouve dans trois régions : Tamazert (El-Milia) à Jijel, Djebel Debbagh à Guelma, Tabelballa à Bechar avec des réserves dépassant 16 Millions de tonnes. Sept types de kaolin local sont obtenus suite au traitement de kaolin brut extrait depuis les gisements d'El-Milia et de Djebel Debbagh. Ce traitement permet d'éliminer les impuretés, de rendre le kaolin plus blanc et dans certains cas de modifier d'autres paramètres, et ce dans le but de l'utiliser dans différentes applications à savoir la fabrication des appareils sanitaires, des carreaux muraux et de sol, de la vaisselle, des produits réfractaires, des produits de charge en papier, des peintures et des colles.

3.2.1.3. *Sable de laitier*

Dans notre étude, on a utilisé le laitier des hauts fourneaux d'El Hadjar. Le laitier de hauts fourneaux est un sous-produit de la production de l'acier dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Ce matériau est formé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances. Les caractéristiques chimiques et physiques sont données dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Composition chimique du sable de laitier

| Composant | (%) |
|--------------------------------|-------|
| SiO ₂ | 33,26 |
| CaO | 44,56 |
| MgO | 4,66 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,06 |
| Al ₂ O ₃ | 9,99 |
| PAF | 0,44 |
| RI | 0,33 |
| SO ₃ | 0,20 |

L'analyse granulométrique ainsi que les propriétés physiques des sables utilisés sont montrées sur la figure 3.1 et dans le tableau 3.2.

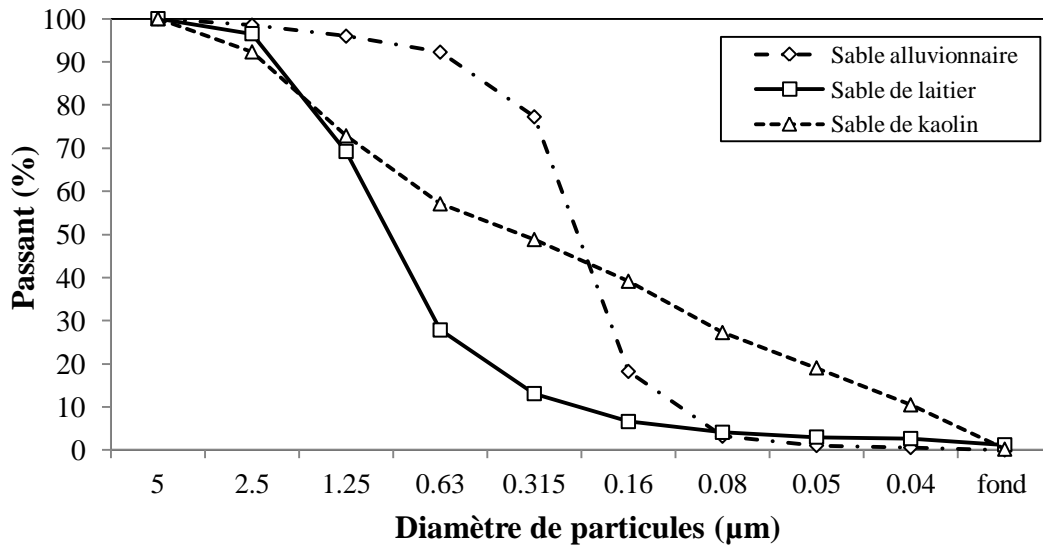


Figure 3.1. Analyse granulométrique des sables utilisés.

Tableau 3.2. Propriétés physiques des sables utilisés

| Paramètre | Sable alluvionnaire | sable de kaolin | Sable de laitier |
|--|---------------------|-----------------|------------------|
| Coefficient d'absorption (%) | 0,84 | 9,85 | 11,9 |
| Masse volumique absolue (kg/m ³) | 2570 | 2280 | 2170 |
| Masse volumique apparente (kg/m ³) | 1,01 | 1,23 | 1,53 |
| Équivalent du sable (%) | 87,5 | / | / |
| Module de finesse | 2,32 | 1,90 | 2,87 |

3.2.2. Gravier :

Deux classes de gravier sont utilisées 3/8 et 8/15. Leurs caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3. Caractéristiques physiques du gravier utilisé

| Paramètre | Gravier 3/8 | Gravier 8/15 |
|--|-------------|--------------|
| Coefficient d'absorption (%) | 4,97 | 3,84 |
| Masse volumique absolue (kg/m ³) | 2670 | 2670 |
| Masse volumique apparente (kg/m ³) | 1280,5 | 1276,3 |

3.2.3. Ciment

Le ciment utilisé est de type Ciment Portland Mokaouem (NA 442 - CEM I 42, 5 N-SR3).

C'est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé. Le tableau 3.4 présente les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du ciment utilisé [39].

Tableau 3.4. Propriétés physiques, chimiques et mécaniques du ciment Mokaouem

| | | |
|-----------------------------|--------------------------------------|-------------|
| Analyse chimique | Perte au feu % (NA5042) | 0,5 à 3 |
| | Teneur en sulfate SO ₃ % | 1,8 à 3 |
| | Teneur en oxyde de magnésium MgO % | 1,2 à 3 |
| | Teneur en chlorure (NA5042) | 0,01 à 0.05 |
| Composition minéralogique | Teneur d'aluminate C3A (%) | < 3 |
| Propriétés physiques | Consistance normale (%) | 25 à 28 |
| | Finesse (cm ² /g) (NA231) | 3200 à 3800 |
| | Retrait à 28 J (μm/m) | <1000 |
| | Expansion (mm) | < 2,0 |
| | Chaleur d'hydratation (j/g) | < 270 |
| Temps de prise | Début de prise (min) | > 60 |
| | Fin de prise (min) | 240 à 400 |
| Résistance à la compression | 2 J (MPa) | >10 |
| | 28 J (MPa) | >= 42,5 |

3.2.4. Adjuvant :

Un adjuvant de type superplastifiant a été utilisé tout au long de cette étude. Les superplastifiants permettent d'obtenir une grande fluidité et une parfaite homogénéité qui sont nécessaires à l'obtention d'un béton autoplaçant.

Le superplastifiant Medaflow 30 est un liquide de couleur jaunâtre, de pH de 6 et de densité de 1,07. L'extrait sec de cet adjuvant représente 30% de sa masse. Cet adjuvant haut réducteur d'eau est de la troisième génération Medaflow 30, il est conçu à base de polycarboxylates qui présentent l'avantage d'améliorer considérablement les propriétés des bétons à l'état frais.

3.2.5. Eau de gâchage

L'eau de robinet a été employée pour la préparation des différents mélanges de BAP. Cette

eau est propre et exempte de toutes impuretés.

3.3. Formulation

Pour obtenir un bon BAP il faut est un béton possède des propriétés spécifiques et contradictoires à l'état frais : une grande déformabilité, une grande capacité de passage et une grande résistance à la ségrégation. Ces propriétés doivent être étudiées et vérifiées.

La formulation du béton conventionnel dépend de deux caractéristiques essentielles qui sont choisies préalablement : la consistance souhaitée et la résistance caractéristique à 28 jours. Pour le béton autoplaçant, la formulation semble plus compliquée.

La méthode de formulation qui sera utilisée dans le présent travail est la méthode générale, car elle est simple, et permet de produire un BAP de propriétés adéquates à la majorité des applications. Par ailleurs, cette méthode présente l'avantage d'être applicable même en utilisant des matériaux locaux, mais à condition de faire quelques modifications notamment au niveau de la teneur en sable [40]. Et comme notre travail s'intéresse à l'étude des propriétés des mortiers autoplaçants contenant des additions minérales en climat chaud nous nous limitons à la formulation du mortier autoplaçant.

3.3.1. Formulation du mortier autoplaçant :

Ces tests ont également pour but de déterminer la teneur en eau (rapport Eau/liant ou E/L), la teneur en sable (rapport Sable/Mortier ou S/M) et le dosage en superplastifiant (rapport Superplastifiant / liant ou SP/L).

Les mortiers sont testés à travers l'essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement au mini-entonnoir en V, Les mortiers autoplaçants sont caractérisés par une grande déformabilité (faible seuil de cisaillement) ce qui favorise leur écoulement sous l'effet gravitaire, et par une viscosité appropriée pour supporter les granulats et éviter tout risque de ségrégation [41] .Pour mesurer ces propriétés.

3.3.1.1. Rapport Eau/liant (E/L) :

Rapport Eau/Liant (E/L) Nous avons effectué beaucoup d'essais préliminaires de mesure d'étalement et de temps d'écoulement afin de fixer le rapport eau/liant (E/L). Felekoglu et al. [42] ont montré que le rapport E/C optimum pour produire un BAP est compris dans l'intervalle 0,84 et 1,07 en volume qui correspond à l'intervalle 0,28 et 0,45 en masse. Les rapports E/C en dessous de cet intervalle peuvent causer un blocage ou une ségrégation du mélange. Les différents essais préliminaires ont montré qu'il faut aller jusqu'au rapport 0,40

afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270 mm surtout dans le cas de faibles dosages en superplastifiants. Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0,40.

3.3.1.2. Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en superplastifiants sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement (mini cône) et du temps d'écoulement (mini entonnoir en V), en fonction du dosage en superplastifiants Sp/L variant de 0.6% à 2%.

3.3.1.3. Confection des mortiers

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculés d'après l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe C. on passe ensuite au malaxage comme suivant :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ 15 secondes afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité) ;
- Dans le reste de la première minute on introduit 70% de la quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) ;
- Le reste de la quantité d'eau (Eau2 = 30% Eau) est ajouté après l'avoir mélangé avec le superplastifiant ;
- Le malaxage est continu pendant 3 autres minutes.

3.4. Protocole d'essais

3.4.1. Essais sur mortier frais :

Les essais sur mortier frais ont pour but en premier temps de fixer le dosage de SP (rapport SP/L).

3.4.1.1. Essai d'étalement au mini-cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu, montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers dans la figure suivant :

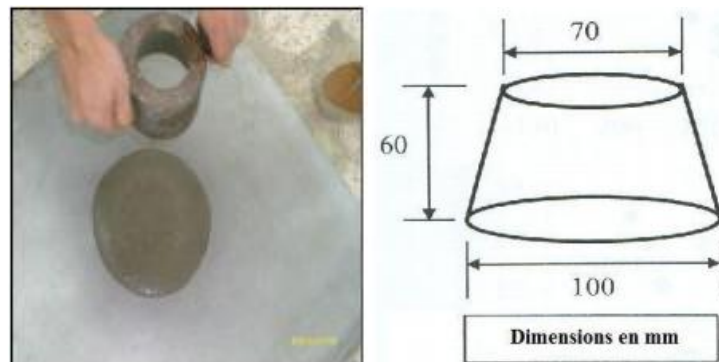


Figure 3.2. Essai d'étalement et les dimensions de Mini-Cône

3.4.1.2. Essai à l'entonnoir en V

Dans l'essai de l'entonnoir en V, l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir, qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$, figure suivant :

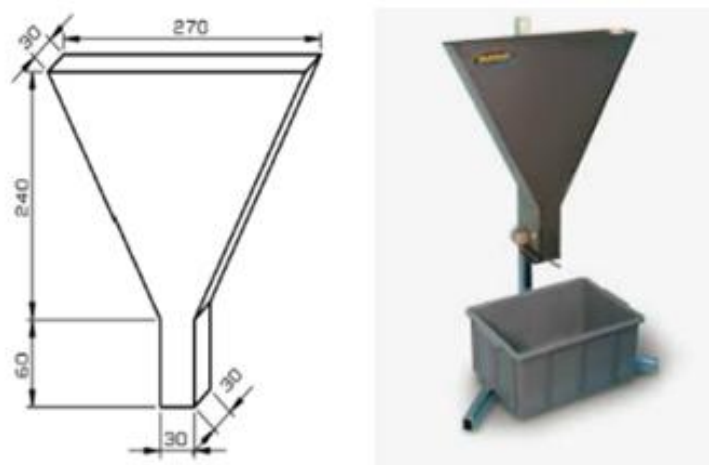


Figure 3.3. Dimension de l'entonnoir V

3.4.2. Essais sur BAP à l'état frais

3.4.2.1. Essai d'étalement

C'est l'essai type pour évaluer la déformabilité libre du béton autoplaçant [43]. L'essai d'étalement est effectué à l'aide d'un cône d'Abrams. Ce dernier est un cône sans fond, dont le diamètre de base inférieur est de 203 mm et le diamètre de base supérieur est de 102 mm. Il a une hauteur de 305 mm. Le cône d'Abrams est habituellement utilisé pour caractériser les

bétons conventionnels par une mesure d'affaissement. Dans le cas des bétons autoplaçants, l'essai de l'affaissement au cône d'Abrams n'est pas significatif car ces bétons sont trop fluides. On utilise donc une mesure de l'étalement. Le principe de l'essai reste cependant le même. A cause de la nature visqueuse du BAP, les lectures des mesures d'étalement doivent se faire après stabilité de la galette, soit environ 60 secondes après soulèvement du cône [44].

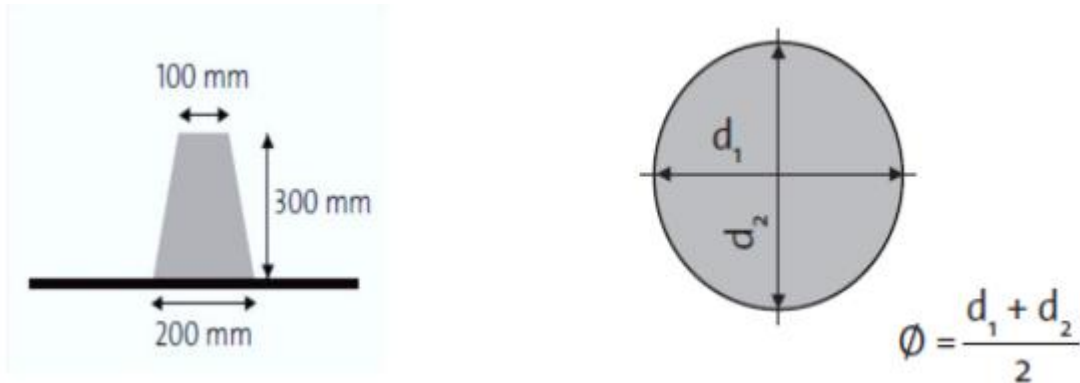


Figure 3.4. Essai d'étalement

Selon [45-46], le BAP peut être divisée en trois (03) classes :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm ;
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm ;
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm.

3.4.2.2. Essai de la couronne J (J-Ring test)

On l'appelle aussi l'essai d'étalement modifié (J-Ring). Il fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage.

A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature de diamètres 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

L'essai à la couronne J (J-ring test) consiste à investiguer les deux propriétés, la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Il peut aussi être utilisé pour étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. L'essai J-ring mesure trois paramètres : l'étalement, le temps d'écoulement TJ50 et le blocage [38].

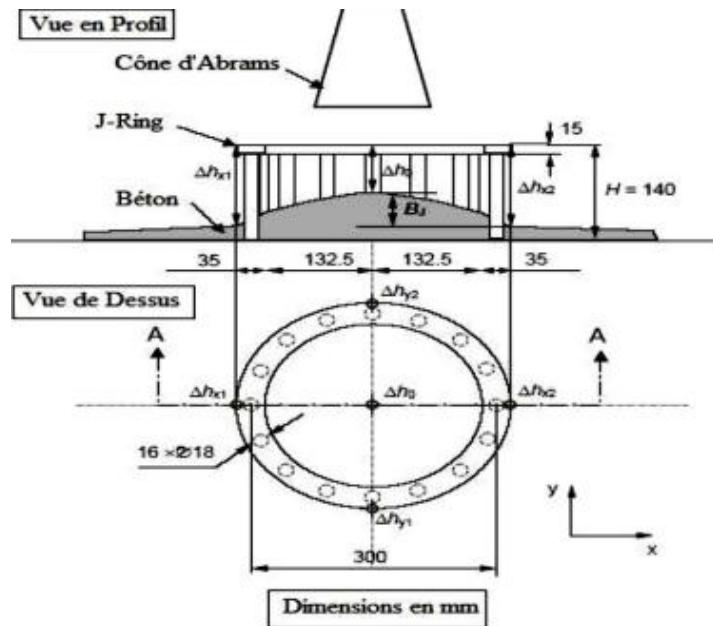


Figure 3.5. Dimensions du J-ring et positions pour mesure de différence d'hauteurs

Le temps d'écoulement T50 est la période entre le moment où le cône est soulevé et le moment où le BAP touche le cercle de diamètre 500 mm. On peut mesurer la différence d'hauteurs B_j du BAP entre l'intérieur et l'extérieur du J-ring pour pouvoir confirmer ou infirmer le blocage. D'après [47-48] pour un bon BAP sans risque de blocage, la différence d'hauteurs B_j ne doit pas dépasser 10 mm. B_j est calculée avec la formule suivante :

$$B_j = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}}{4} - \Delta h_0$$



Figure 3.6. Essai de la couronne J (J-Ring test)

3.4.2.3. Essai de stabilité au tamis (Résistance à la ségrégation)

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplacants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplacant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier [49]. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'expression :

$$IS = (Q_{bp} / Q_{eT}) * 100$$

IS : indice de ségrégation ;

Q_{bp} : quantité du béton passant à travers un tamis de 5 mm ;

Q_{eT} : quantité totale du béton.

Il consiste à évaluer le pourcentage en masse d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplacant sont divisés en trois classes [49] :

- $0\% \leq \% IS \leq 15\%$: stabilité satisfaisante ;
- $15\% < \% IS \leq 30\%$: stabilité critique ;
- $\% \text{ l'indice ségrégation} > 30\%$: stabilité très mauvaise : béton inutilisable.



Figure 3.7. Essai de stabilité au tamis

3.4.3. Essais sur BAP à l'état durci

Pour chaque mélange, trois échantillons ont été testé pour évaluer la résistance à la flexion et six échantillons pour déterminer la résistance à la compression. Ces essais ont été effectués conformément à [50]. L'essai d'absorption d'eau par immersion a été également réalisé.

3.4.3.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques. L'essai de compression se fait, dans notre cas, sur six morceaux de trois éprouvettes prismatiques qui ont été préalablement écrasées par flexion. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture moyennant une presse hydraulique de capacité de 3000 KN, cette presse est muni d'un affichage digital permettant d'entrer la surface de l'éprouvette, la vitesse de chargement (2,5 kN/s) et d'obtenir la force et la résistance à la compression. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de (7×7×28) cm à 28 jours.

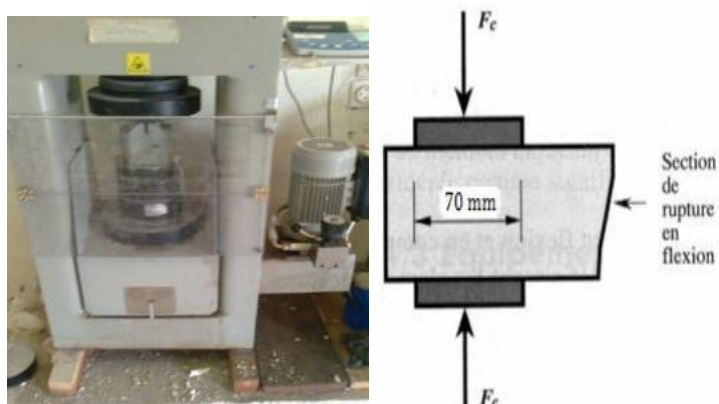


Figure 3.8. Dispositif de l'essai de la résistance à la compression.

3.4.3.2. Résistance à la traction par flexion trois points

L'essai de résistance à la traction consiste à soumettre des éprouvettes prismatiques reposant sur deux appuis à une charge croissante concentrée au milieu jusqu'à la rupture. La charge est appliquée à l'aide d'une presse à lecture digitale reliée à un système d'acquisition (PC) par lequel on introduit la vitesse de chargement (50 N/s). La force à la rupture est donnée par le même système. La résistance à la traction est obtenue en faisant un simple calcul de résistance des matériaux. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de (7×7×28) cm à 3, 7, 28, 56 et 90 jours. Nous pouvons calculer la contrainte de traction par flexion selon l'opération suivant :

$$\sigma_r = \frac{3F_f l}{2a^3}$$

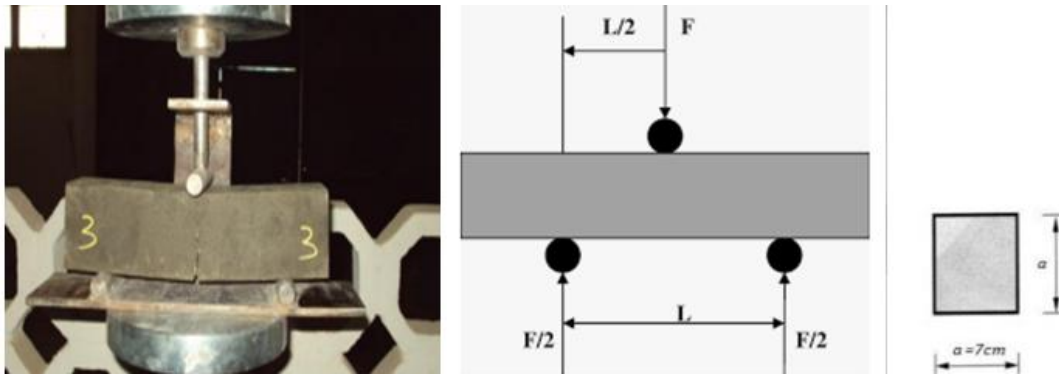


Figure 3.9. Dispositif de l'essai de la résistance à la traction par flexion trois point

3.4.3.3. Essai d'absorption d'eau par immersion totale

L'essai de la porosité accessible à l'eau a été réalisé selon le mode opératoire recommandé par AFREM [51]. La méthode consiste à sécher préalablement des éprouvettes cubiques 10*10*10 à l'étuve à 105±5°C pendant 72 heures. Les éprouvettes sont ensuite retirées et laissées refroidir, puis sont pesées soit M_0 . Par la suite, les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau à 20°C pendant 72 heures. Après cette période, les éprouvettes sont retirées, et après avoir étoffé leurs faces à l'aide d'une serviette, sont pesées de nouveau soit M_1 . Le taux d'absorption est calculé comme suit :

$$C_a = \left(\frac{M_1 - M_0}{M_0} \right) \times 100$$

Où C_a : taux d'absorption en % ;

M_0 : masse de l'éprouvette à l'état sec en kg ;

M_1 : masse de l'éprouvette à l'état saturé en kg ;

Chapitre 4 :

Présentation et analyse des résultats

4.1 Introduction

Après l'achèvement de la partie expérimentale, nous allons aborder le dernier chapitre, dans lequel nous nous intéressons à la présentation et l'interprétation des résultats d'essais sur mortiers à l'état frais, bétons à l'état frais et à durcis.

4.2 Mortier à l'état frais

4.4.1. Optimisation de rapport SP/C

Les essais sur mortiers visent à déterminer le dosage de superplastifiant qui permet donner un mortier très fluide de viscosité appropriée et de grande résistance à la ségrégation. Le sable alluvionnaire est substitué par différents pourcentages (20, 40, 60, 80 et 100%) de sable de kaolin. Nous avons commencé par un dosage de superplastifiant de 1,1%, la composition de différents mélanges ainsi que les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 4.1.

Un pourcentage de SP de 1,1% a donné des mortiers très fluides (100SA et 80SA20SK), qui sont caractérisés par un étalement variant entre 30,5 et 31,25 cm et un temps d'écoulement de 4 et 3,05 s. Ces valeurs sont dans le domaine ciblé (27-33 cm et 2-10 s). L'utilisation d'une quantité de SK supérieure à 20% conduit à une augmentation du dosage de SP de 1,1 à 1,35%. Pour les différents mélanges des pourcentages de SP variant de 1,1 à 1,35% seront utilisés dans la suite du travail, car ils ont donné des mélanges fluides et homogènes, qui respecte les trois critères caractérisant les MAP.

Tableau 4.1. Compositions des différents mélanges (pour 1m³) et résultats d'essais d'optimisation du rapport SP/C

| Mélanges | 100SA | 80SA20K | 60SA40K | 40SA60K | 20SA80K | 100K | | | | |
|--------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|------|-------|-------|-------|
| E/P | 0,4 | | | | | | | | | |
| Ciment (kg) | 690,65 | | | | | | | | | |
| Sable Alluvionnaire (kg) | 1515 | 1044 | 783 | 522 | 261 | 0 | | | | |
| Sable de kaolin (kg) | 0 | 261 | 522 | 783 | 1044 | 1515 | | | | |
| Eau (kg) | 281,65 | 269,57 | 257,48 | 245,4 | 233,3 | 221,22 | | | | |
| Superplastifiant (%) | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,15 | 1,1 | 1,25 | 1,1 | 1,35 | 1,2 | 1,35 |
| Superplastifiant (kg) | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 10,33 | 7,6 | 11,23 | 7,6 | 12,12 | 10,77 | 12,12 |
| Etalement (cm) | 30,5 | 31,25 | 27,5 | 28,5 | 24 | 29,1 | 22,5 | 28,8 | 27 | 30,3 |
| Temps d'écoulement (s) | 4 | 3,05 | 5,15 | 4,71 | 6,26 | 5,54 | 10,3 | 7,82 | 5,47 | 3,89 |

4.3 Béton autoplaçant à l'état frais

Les essais effectués sur béton frais ont pour but l'étude de l'effet de substitution de sable alluvionnaire par du sable de kaolin sur ses propriétés de fluidité, de capacité de passage et de stabilité. Les compositions des mélanges élaborés ainsi que les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 4.2 (8/15).

Tableau 4.2. Compositions des différents mélanges de BAP et résultats d'essais à l'état frais (pour 1 m³)

| Mélanges | 100SA | 80SA20K | 60SA40K | 40SA60K | 20SA80K | 100K |
|---|--------|---------|---------|---------|---------|--------|
| E/P | 0,4 | | | | | |
| Ciment (kg) | 469,05 | | | | | |
| Sable Alluvionnaire (kg) | 886,28 | 709,02 | 531,76 | 354,51 | 177,25 | 0 |
| Sable de kaolin (kg) | 0 | 177,25 | 354,51 | 531,76 | 709,02 | 886,28 |
| Eau (kg) | 226,60 | 218,4 | 210,19 | 201,99 | 193,78 | 185,57 |
| Superplastifiant (%) | 1,1 | 1,1 | 1,15 | 1,25 | 1,35 | 1,35 |
| Superplastifiant (kg) | 5,16 | 5,16 | 5,40 | 5,86 | 6,33 | 6,33 |
| Gravier 3/8 (kg) | 276,67 | | | | | |
| Gravier 8/15 (kg) | 553,33 | | | | | |
| Temps d'écoulement T50 (s) | 3,99 | 3,78 | 1,94 | 1,6 | 2,29 | 8,45 |
| Étalement (cm) | 66,5 | 72,5 | 67 | 72 | 70,5 | 50 |
| Étalement J-ring (cm) | 64 | 69 | 65 | 68,5 | 68 | 40,5 |
| Différence d'hauteurs B _j (cm) | 0,63 | 2 | 2,88 | 2 | 2,38 | 1,75 |
| Indice de ségrégation (%) | 4,14 | 20,28 | 12,29 | 13,08 | 12,91 | 1,71 |

4.3.1. L'étalement au cône d'Abrams

Les résultats d'étalement au cône d'Abrams sont traduits en histogrammes de la figure 4.1. Nous constatons que l'étalement des BAP (100SA, 80SA20SK, 60SA40SK, 40SA60SK et 20SA80SK) sont dans la fourchette de la classe SF2, étalement compris entre (660 et 750 mm), tandis que le BAP (100SK) s'inscrit dans la classe SF1 (550mm). Nous remarquons une légère augmentation de l'étalement avec l'ajout 20% de SK. Au-delà de 20% l'étalement se stabilise jusqu'à un pourcentage de substitution de 100% où on a observé une diminution considérable de l'étalement.

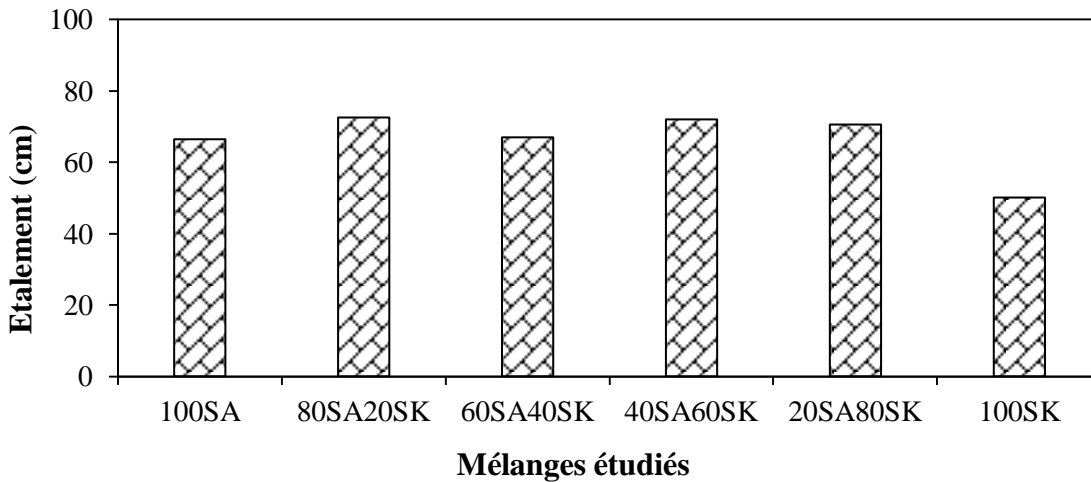


Figure 4.1. Variation de l'étalement de cône d'Abrams

4.3.2. Temps d'écoulement T50

Les résultats de temps d'écoulement T50 sont illustrés sur la figure 4.2. les valeurs du temps d'écoulement obtenus varie entre 1,6 et 8,45%. L'addition du sable de kaolin avec un pourcentage variant entre 20 et 80% résulte une diminution du temps d'écoulement et par conséquent de la viscosité du BAP. La substitution totale de SA par de SK entraîne une augmentation du temps d'écoulement et de la viscosité du BAP.

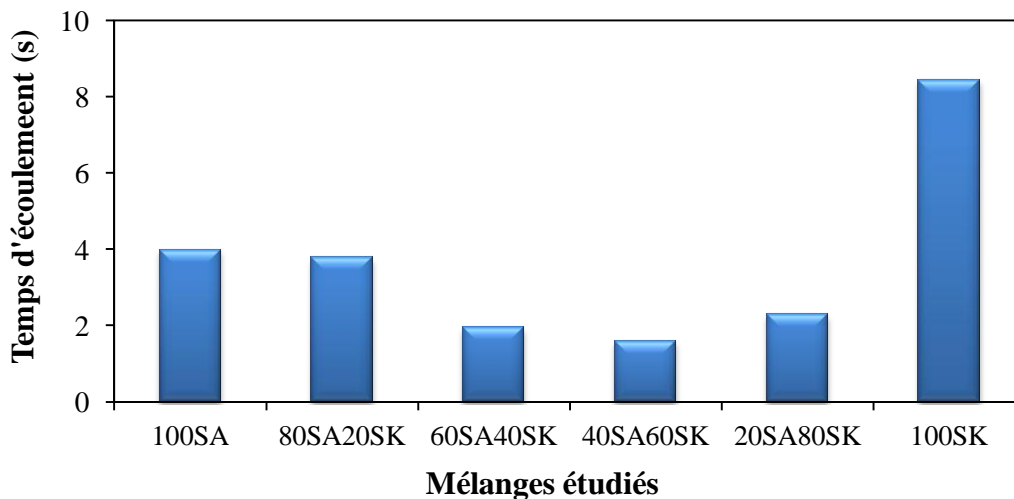


Figure 4.2. Évolution du temps d'écoulement T50 pour différents mélanges de BAP

4.3.3. L'étalement au J-ring

Les résultats de l'étalement au J-ring sont représentés dans la Figure.4.3. L'étalement varie entre 600 et 700 mm pour les mélanges 100SA, 80SA20SK, 60SA40SK, 40SA60SK et 20SA80SK. La substitution totale de sable alluvionnaire par du sable du kaolin a conduit à

une perte considérable de la fluidité et de la capacité de passage du béton car l'étalement obtenu est de l'ordre de 400 mm.

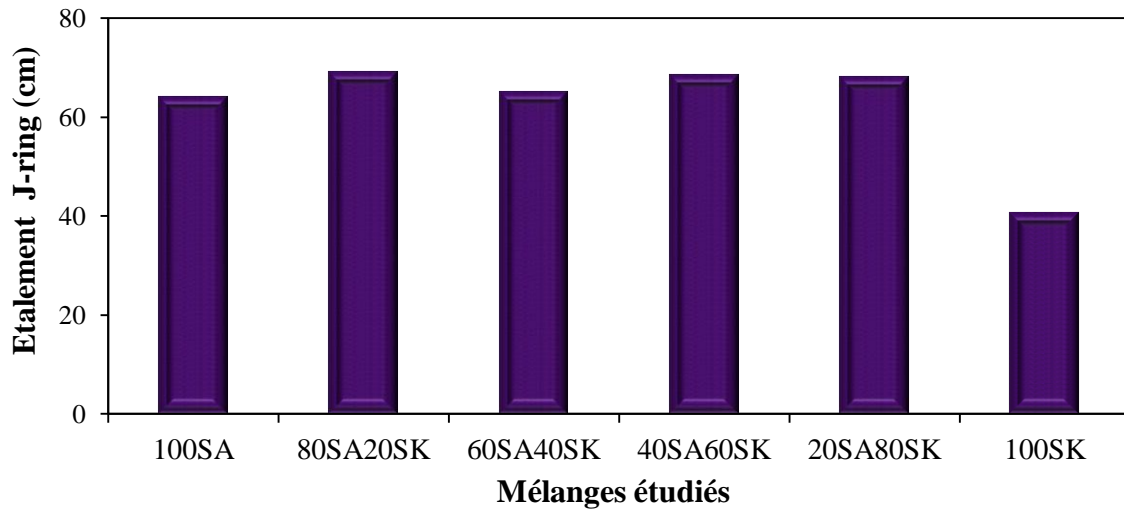


Figure 4.3. Variation de l'étalement de J-ring

4.3.4. Différence d'hauteurs (J-Ring test)

Les résultats de différence d'hauteurs sont présentés dans la figure 4.4. La valeur de B_j ne doit pas dépasser 10 mm selon [53]. L'analyse des résultats de cette figure montre que le seul mélange qui n'a pas dépassé 10 mm est le mélange de référence (0,63 mm). Nous observons que l'ajout du SK affecte négativement la capacité de passage du BAP (60SA40SK) car les valeurs de B_j sont supérieures à 10 mm.

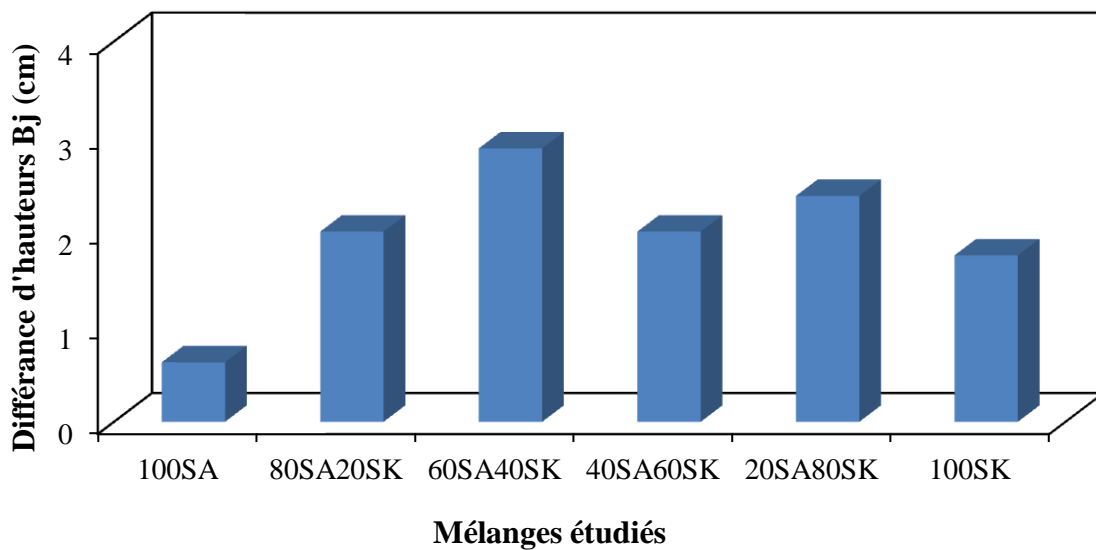


Figure 4.4. Différence d'hauteurs pour différents mélanges de BAP

4.3.5. Essai de stabilité au tamis

Les résultats issus de l'essai de stabilité au tamis sont montrés sur la figure 4.5. On constate que les pourcentages de laitance passant à travers le tamis sont compris entre 1,71 et 20,28 %. Ces résultats montrent que tous les mélanges possèdent une bonne résistance à la ségrégation, à l'exception du mélange contenant 20% de SK car son indice de ségrégation dépasse 15% selon EFNARC [53], sa stabilité est considérée mauvaise.

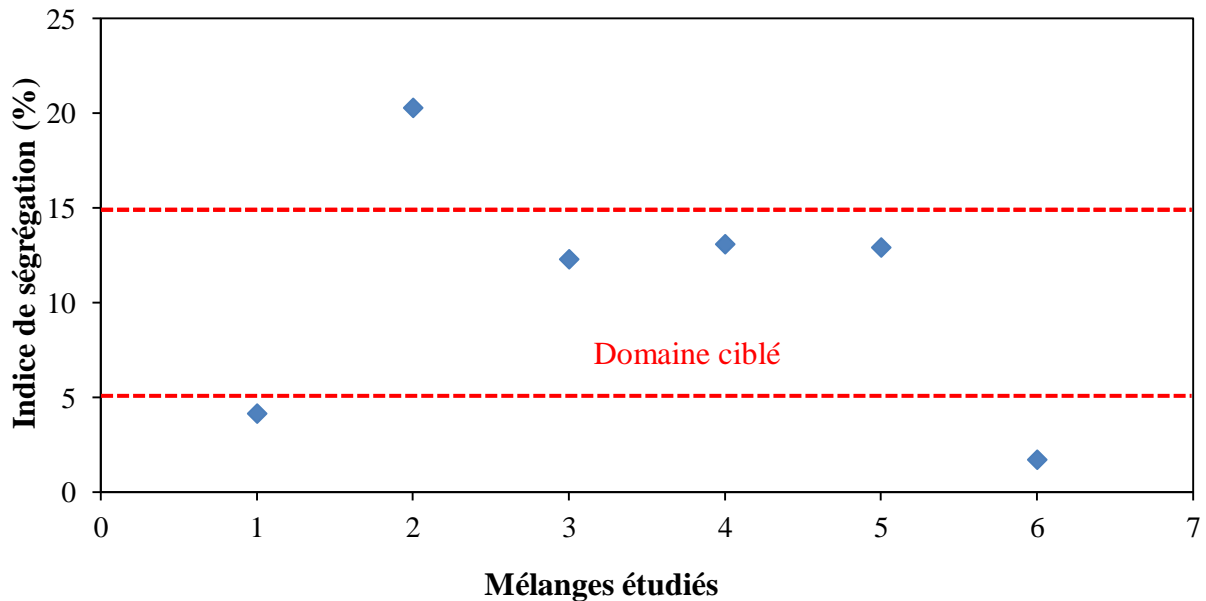


Figure 4.5. Variation de l'indice de ségrégation pour différents mélanges de BAP.

4.4 Essais sur BAP à l'état durci

4.4.1. Résistance à la compression

La figure 4.6 montre la variation de la résistance à la compression des différents BAP à 28 jours. La composition de référence est celle qui présente la valeur la plus grande de résistance à la compression (47 MPa). L'incorporation du SK par substitution du SA cause une diminution remarquable de la résistance à la compression. Les mélanges contenant 20, 40, 60, 80 et 100% de SK présente une résistance à la compression inférieure respectivement par environ 17, 22, 33, 55 et 59% par comparaison au mélange 100SA. L'utilisation de sable de kaolin jusqu'à 60% a donné des résistances supérieures à 25 MPa (résistance caractéristique du béton ordinaire). Ceci permet de produire des bétons autoplaçants destinés aux différentes applications structurales.

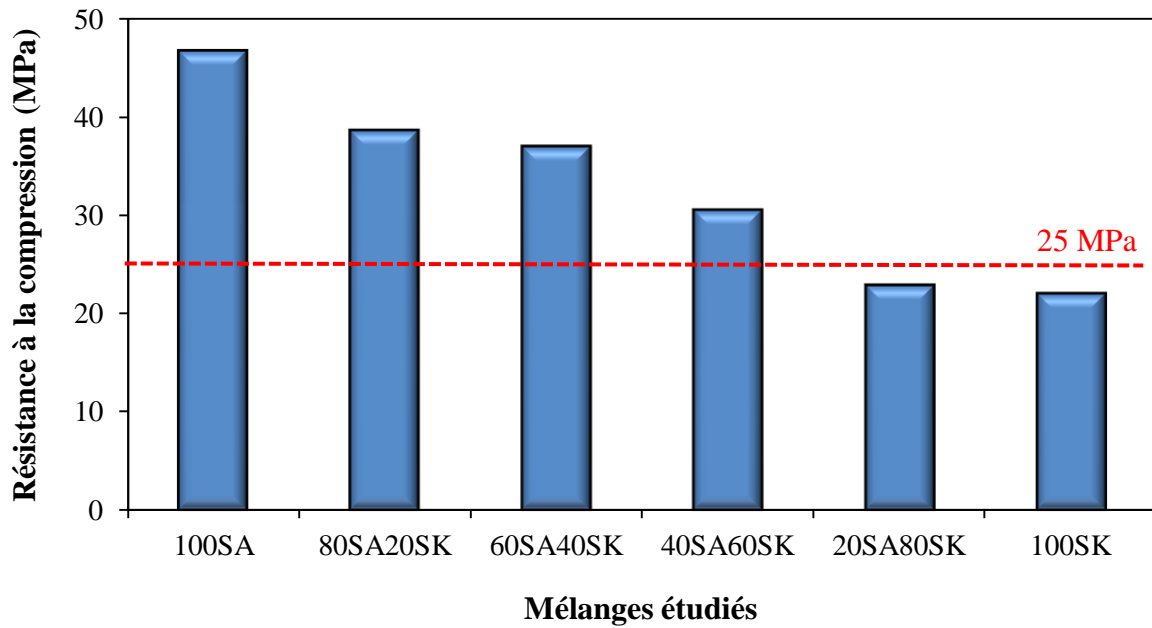


Figure 4.6. Résistance à la compression à 28 jours des différents BAP.

4.4.2. Résistance à la traction par flexion trois points

Les résultats de la résistance à la flexion des bétons autoplaçants formulés avec différentes combinaisons SA et SK sont illustrés sur la figure 4.6. Les valeurs obtenues de la résistance à la flexion varient entre 4,81 et 6,31 MPa. Nous remarquons une légère diminution de la résistance à la flexion avec l'ajout de 20% de SK. La résistance augmente légèrement pour des pourcentages en SK de 40 et 60%, puis elle chute pour des pourcentages de SK de 80 et 100%.

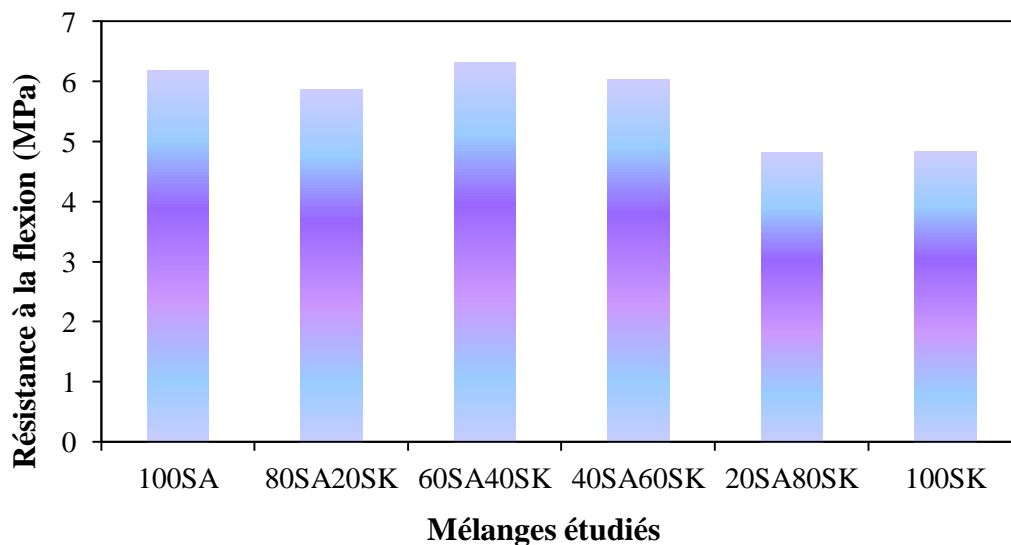


Figure 4.7. Résistance à la flexion à 28 jours des différents BAP.

4.4.3. Absorption d'eau par immersion

Les résultats de l'absorption sont traduits dans l'histogramme de figure 4.8. Nous remarquons que le pourcentage d'absorption d'eau dans tous les mélanges varie entre 6 et 13%. On note une augmentation de la quantité d'eau absorbée avec l'augmentation du pourcentage du sable de kaolin. La substitution du SA par 20, 40, 60, 80 et 100% de SK conduit à une augmentation du taux d'eau absorbée respectivement par environ 12,16 ; 31,91 ; 63,51 ; 98,42 et 107,42. On conclut que l'addition du SK résultat un BAP plus perméable à l'eau. Selon l'AFREM, l'absorption ne doit pas dépasser 10% pour un béton durable, ce qui le cas des mélanges contenant moins de 80% de sable de kaolin.

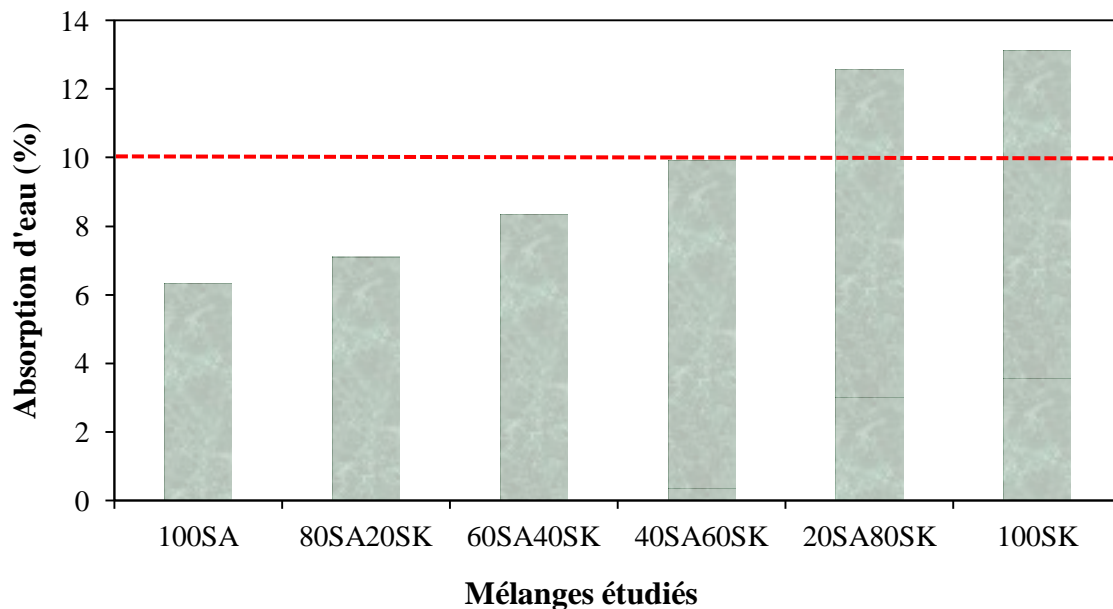


Figure 4.8. Absorption d'eau par immersion des différents BAP.

Conclusion générale

Les objectifs de notre étude étaient de produire un béton autoplaçant économique de faible impact environnemental, et ce à travers le remplacement du sable alluvionnaire par du kaolin et des déchets de laitier qui sont disponibles dans le marché Algérien. Ce travail a été mené sur deux étapes. Dans la première étape, on a effectué des essais pour déterminer les caractéristiques trois sables (sable alluvionnaire, sable kaolin et sable laitier) et le dosage en superplastifiant, puis on s'est intéressé à l'étude de l'effet des deux sables (sable kaolin et sable laitier) sur les propriétés des mortiers autoplaçants à l'état frais. Dans la deuxième étape, on s'est limité à l'étude de l'effet des deux sables sur les propriétés physico-mécaniques des bétons autoplaçants. En se basant sur les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats obtenus permettent de conclure qu'il est possible d'utiliser des matériaux locaux pour la confection des mortiers et bétons autoplaçants ;
- Un dosage en superplastifiant à base de polycarboxylates de 1,1 à 1,35% est convenable pour produire des mortiers et bétons autoplaçants ;
- L'introduction du sable de kaolin avec un pourcentage supérieur à 20% nécessite une augmentation du dosage de superplastifiant pour avoir la fluidité désirée ;
- Le remplacement total du sable alluvionnaire par du sable de kaolin conduit à une réduction importante de l'étalement du BAP ;
- L'addition du sable de kaolin avec un pourcentage variant entre 20 et 80% résulte une diminution du temps d'écoulement et par conséquent de la viscosité du BAP ;
- L'incorporation du sable de kaolin jusqu'à un pourcentage de 80% peut être envisagée sans risque de perdre l'homogénéité du BAP ;
- Des bétons autoplaçants contenant 20% à 60% de sable kaolin sont homogènes, au-delà de 60%, le BAP présente un peu risque de ressuage ;
- À l'état durci, le remplacement partiel du sable kaolin mène à une diminution des résistances à la compression et à la flexion ;
- L'augmentation du pourcentage de sable de kaolin de 20% à 100% rend le béton plus perméable à l'eau.

Références bibliographiques

- [1]: Serifou M ; AL (2008). Recherche de substitut du gravier dans le béton: Utilisation de déchets non biodégradables (ciment durci, bouteille, pneu usagé), Mémoire de DEA, Université Cocody-Abidjan.
- [2]: Eldin, N.N., Senouci, A.B., 1993. Rubber– tire particles as concrete aggregate. *J. Mater. Civil. Eng.* 5 (4), 478–496.
- [3]: Topçu, The properties of rubberized concretes, *Cement and Concrete Research* Volume 25, Issue 2, February 1995, Pages 304-31.
- [4]: Okamura H., Ouchi M., Self-compacting concrete, development, present use and future, in A. Skarendahl, O. Petersson (Eds.), *Self-Compacting Concrete*, RILEM Symposium Stockholm, RILEM Publications, 1999, pp. 3 – 14.
- [5]: Okamura H., Ouchi M., Self-compacting concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, N°1, 2003, pp. 5 15.
- [6] : PATRICK GUIRAUD, <https://www.infociments.fr/betons/principes-de-formulation-des-BAP> Septembre 2016.
- [7] : M. BAALBAKI: «Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des béton :Importancedumoded’interactiondesadjuvants».Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec. Septembre 1998.
- [8] : RACHID BERBAOUI, (Identification et Analyse de l’endommagement par Fatigue des Matériaux Granulaires a Base Polymère), Thèse de Doctorat de l’université du Maine Soutenue le 21 Janvier 2010.
- [09] : L.Azzouz ; M.Bouhicha ; S.Kenai ; M.Hadjoudja : Recyclage des déchets de briques dans le béton de sable de dunes. *PROCEEDINGS* du 1er colloque national de génie civil : matériaux de construction, novembre 2000, université de Mostaganem.
- [10] : Neville A., « Propriétés des bétons » édition Eyrolles, 2000.
- [11] : De Larrard F. « Structures granulaires et formulation des bétons », édition Laboratoire central des ponts et chaussées, 2000.

- [12] : De Larrard F., Ferraris C. « Béton frais remanié I et II et III », BLPC. N° 213 pp 73-89, Jav-fév 1998.
- [13] : F. Buyle-Bodin, R.H. Zaharieva, Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete, *Materials and Structures*, 35 (2002) 504-509.
- [14] : Rapport technique - Bâtiments exemplaires, L'utilisation de granulats issus du recyclage, p.24.
- [15] : C. S. Poon, D. Chan, The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong', *Resources, Conservation and Recycling*, 50 (2007) 293-305.
- [16] : Diego Carro-López, Belén González-Fonteboa, Jorge de Brito, Fernando Martínez-Abella, Iris González-Taboada, Pedro Silva. Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* 96 (2015) 491–501.
- [17] : ACHE, Self-compacting concrete: design and appliances, Asociación Científica del Hormigón Estructural, Madrid, 2008 (in Spanish).
- [18] : Harbi R. Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de déchets de briques. Mémoire de Magister 2009, Université de Guelma, Algérie.
- [19] : Bourmatte Nadjoua. Granulats recycles de substitution pour betons hydrauliques : beton de demolition - dechets de briques - dechets de verre. Doctorat en sciences, Universite des Freres Metouri Constantine, 2017, p. 176.
- [20] : F. Bektas, K. Wang, H. Ceylan. Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1909–1914.
- [21] : Celik M.Y, Sabah E. Geological and technical characterization of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution. *Journal of Environmental Management* 2008; 87: 106-116.
- [22] : Alyamac K.E, Ince R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction Building Materials* 2009; 23: 1201-1210.
- [23] : Tunc E.T. Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste. *Journal of Environmental Management* 2019; 231: 86-97.

- [24] : Aruntas H.Y, Guru M, Dayi M., Tekin I. Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. *Materials and Design* 2010; 31: 4039-4042.
- [25] : BOUKHELKHAL Aboubakeur. Comportement physico-mécanique et durabilité en climat chaud des mortiers autoplaçants à base d'ajouts binaires et ternaires. Thèse de Doctorat, Université Ammar Telidji de Laghouat, 2019, p. 271.
- [26] : Senthamarai R.M, Manoharan P.D. Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement and Concrete Composites* 2005; 27(9-10): 910-913.
- [27] : Gonzalez-Corominas A, Etxeberria M. Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. *Construction and Building Materials* 2014; 68: 618-626.
- [28] : Subaşı S Öztürk H Emiroğlu M. Utilizing of waste ceramic powders as filler material in selfconsolidating concrete. *Construction and Building Materials* 2017; 149: 567-574.
- [29] : Paul O. Awoyera, Julius M. Ndambuki, Joseph O. Akinmusuru, David O. Omole. Characterization of ceramic waste aggregate. *Concrete. HBRC Journal*, 2016.
- [30] : Benimam Samir, Debieb Farid, Bentchikou Mohamed, Guendouz Mohamed. Valorisation et recyclage des déchets plastiques dans le béton. *MATEC Web of Conferences* 11, 2014.
- [31] : Bourmatte Nadjoua. Granulats recyclés de substitution pour betons hydrauliques : beton de demolition - dechets de briques - dechets de verre. Doctorat en sciences, Université des Freres Metouri Constantine, 2017, p. 176.
- [32] : FALI Imane. Propriétés mécaniques des bétons à base de granulats en caoutchouc. Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou, 2016, p.128.
- [33] : H. Cherfa, K. Ait Mokhtar. Utilisation de granulats de laitier cristallisé comme matériau de construction en technique routière.
- [34] : Zeghichi L. Etude des liants et bétons à base des alcalis et ciments au laitier. Thèse de magister, Université de Biskra, Biskra, Algérie, 1998, p.120.
- [35] : M. Valcuende, F. Benito, C. Parra, I. Miñano. Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials* 76 (2015) 1–9.

- [36] : Oliveira L.A.P, Jalali S, Fernandes J.M, Torres E. L'emploi de métakaolin dans la production de béton écologiquement efficace. *Materials and Structures* 2005; 38 : 403-10.
- [37] : Sposito, G. *The Chemistry of Soil*, 3rd ed. Oxford University Press, New York, 2016; pp. 255.
- [38] : Infociments. L'essentiel: les données statistiques annuelles de l'industrie cimentière en France, 2017. <https://www.infociments.fr/infociments-2017-lessentiel>.
- [39] : Lafarge Algérie, centr commercial bab zaouar tour n°2 etage 5 et 6.
- [40] : Okamura H, Ozawa K. Mix-design for self-compacting concrete. *Concrete Library of Japan Society of civil Engineers* 1995; 25: 107-120.
- [41] : Boukendakdji O. Étude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : Optimisation des conditions opératoires. Thèse de Doctorat de l'Université Saad Dahleb de Blida, Algérie, 2010, pp. 193.
- [42] : Liu M. Wider application of additions in self-compacting concrete. PhD Thesis of University College London, UK, 2009, pp. 392.
- [43] : EN 196-1. Methods of testing cement-Part 1: Determination of strength, 2002.
- [44] : EN 12504-4 : Essais pour béton dans les structures – Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son, 2005.
- [45] : EFNARC, 2002 EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2002 .
- [46] : EFNARC, 2005 EFNARC, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete : Specification, Production and Use, 2005.
- [47] : Domone P.L., Jin J., Properties of mortar for Self-Compacting Concrete, Proceedings of the 1st International Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson Stockholm, Sweden, 1999, pp. 109 – 120.
- [48] : De Schutter G., Guidelines for testing fresh self-compacting concrete, European Research Project: Measurement of properties of fresh self-compacting concrete, Growth contract N° GRD2-2000-30024, September 2005, p. 24.
- [49] : Jin J., Properties of mortar for self-compacting concrete, PhD thesis, University of London, 2002, p. 398.

[50] : Domone P.L., Jin J., Properties of mortar for Self-Compacting Concrete, Proceedings of the 1st International Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings (PRO 7), Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson Stockholm, Sweden, 1999, pp. 109 – 120.

[51] : AFPC-AFREM, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », sous la direction de J.P. Ollivier, Toulouse, 1997, p. 283.

[52] : AFGC, Association française de Génie Civil, Bétons Autoplaçants ; Recommandations provisoires, documents scientifiques et techniques, 2002, p. 63.

[53] : EFNARC, The European guidelines for self-compacting concrete, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, 2005, p. 68.