

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Civil
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement
LAFARGE - Centre de Développement de la Construction (CDL)

Mémoire de Projet de Fin d'Études
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Civil

Valorisation de poudre de verre dans la formulation de béton autoplaçant

Réalisé par :

Cheribet Drouiche Zoheir seif el islem

Présenté et soutenu publiquement le (26/06/2023)

Composition du Jury

Président du jury	M. Saadi LAKEHAL	MCB	ENP
Encadrante	Mme. Messaouda CHERRAK	MCB	ENP
Co-Encadrant	M. Hamid ZEROUB	TSM	LAFARGE
Examineur	M. Brahim Khalil BENAZOUZ	MCA	ENP
Invité	M. Abderrahim BALI	Professeur	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Civil
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement
LAFARGE - Centre de Développement de la Construction (CDL)

Mémoire de Projet de Fin d'Études
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Civil

Valorisation de poudre de verre dans la formulation de béton autoplaçant

Réalisé par :

Cheribet Drouiche Zoheir seif el islem

Présenté et soutenu publiquement le (26/06/2023)

Composition du Jury

Président du jury	M. Saadi LAKEHAL	MCB	ENP
Encadrante	Mme. Messaouda CHERRAK	MCB	ENP
Co-Encadrant	M. Hamid ZEROUB	TSM	LAFARGE
Examineur	M. Brahim Khalil BENAZOUZ	MCA	ENP
Invité	M. Abderrahim BALI	Professeur	ENP

Dédicaces

A ma mère

À toi, ma source d'amour inconditionnel, de soutien inébranlable et de dévouement infini. Ce travail est une humble reconnaissance de ton rôle essentiel dans ma vie. Tu as été ma force motrice durant toute ma carrière scolaire. Tes encouragements, tes conseils ont façonné la personne que je suis aujourd'hui. Merci d'être toujours là pour moi. Ce travail est dédié à toi, ma mère extraordinaire

À mon père

À toi, mon guide, mon mentor . Ce travail est un témoignage de gratitude pour tout ce que tu as fait pour moi. Tes enseignements, ton soutien et ta sagesse m'ont guidé tout au long de ma vie. Tu as été une source inépuisable d'inspiration et de motivation. Je suis honoré de te dédier ce travail, en reconnaissance de ton impact positif sur moi.

À mes frères Sofiane , Anes

À vous, mes complices inséparables et mes fidèles compagnons,. Ce travail est un hommage à notre complicité, nos rires partagés et nos moments de croissance mutuelle. Votre présence constante dans ma vie a été un soutien inestimable. Merci d'être mes frères, mes alliés et mes confidents. Ce travail est dédié à notre lien indéfectible et à notre amour fraternel.

À ma petite soeur Alla

À toi, ma petite étoile, ma source de joie et d'innocence. Ce travail est une dédicace spéciale à toi. Tu es une source constante d'inspiration avec ta curiosité et ta capacité à voir la beauté du monde. Ce travail t'est dédié, ma chère petite sœur, pour te rappeler à quel point tu es précieuse et aimée.

ce travail est dédié aussi à tous les membres de ma famille, Chacun de vous a contribué à sa manière à ma réussite, en me prodiguant des conseils avisés et en m'insufflant la confiance nécessaire . Vos encouragements incessants m'ont permis de surmonter les obstacles et de croire en mes capacités.

Je souhaite également adresser une dédicace spéciale à mes amis. Votre amitié et votre présence constante ont été des piliers essentiels tout au long de ce parcours. Merci d'avoir partagé avec moi les moments de joie et de difficultés. Votre amitié est précieuse et je vous en suis profondément reconnaissant.

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience , pour surmonter les défis et à accomplir mes objectifs.

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Madame **Messaouda CHERRAK** pour ses précieux conseils et son encadrement exceptionnel. Travailler avec elle a été une expérience enrichissante et agréable. Sa compétence, son dévouement et son soutien ont été d'une valeur inestimable. Je suis reconnaissant d'avoir eu l'opportunité de bénéficier de son savoir-faire et de son expertise..*

*Mes remerciements s'adressent également à Monsieur **Hamid ZEROUB**, une personne dotée de grandes qualités. Il m'a énormément aidé tout au long de ma période de stage et j'ai beaucoup appris de lui. Sa contribution et son soutien ont été d'une valeur inestimable, et je lui suis profondément reconnaissant pour son engagement et sa générosité.*

*Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à toute l'équipe de Lafarge , **Bilel, Nabil, Rafik, Remdane, Redouane, Kamel, Samir, Houcine** et **Younes**. Leur bienveillance et leur soutien durant ma période de stage ont été d'une grande importance pour moi. Également, je tiens à témoigner ma profonde reconnaissance envers l'équipe de laboratoire de Génie Civil de l'ENP, **Samia SAKHRI** et **Ahmed GHARNAT**, pour leur précieuse collaboration et leur assistance. Leur implication a joué un rôle essentiel dans la concrétisation de mon projet.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers les membres du jury, Monsieur **Saadi LAKEHAL**, d'avoir accepté d'assumer la présidence de mon jury. C'est un véritable honneur pour moi. Je souhaite également adresser mes chaleureux remerciements à Monsieur **Brahim Khalil BENZAOUZ**, je suis profondément reconnaissant envers lui pour son excellence en tant qu'enseignant . Sa contribution à ma formation a été inestimable.*

*Je tiens également à remercier Monsieur **Abderrahim BALI** , un pilier de l'ENP et un professeur qui a su éveiller en moi l'amour pour les matériaux de construction dès ma première année au département de Génie civil . Votre présence lors de ma soutenance représente un grand honneur pour moi.*

Je ne saurais terminer sans exprimer ma gratitude envers le corps professoral du département de Génie Civil de l'ENP . Leur expertise, leur enseignement et leur soutien ont été d'une importance capitale pour ma formation académique. Je suis profondément reconnaissant envers tous les membres du corps professoral pour leur contribution à mon parcours éducatif. Leurs enseignements ont été une source d'inspiration et ont contribué à façonner ma passion pour le Génie Civil. Je leur adresse mes sincères remerciements pour leur impact positif dans ma vie académique et professionnelle

ملخص

الأسمنت هو مادة تستخدم على نطاق واسع في البناء بسبب قوته ومتانته. ومع ذلك ، فإن إنتاج الأسمنت يُعتبر مصدراً رئيسياً لانبعاث ثاني أكسيد الكربون . في سعينا للعثور على بدائل تكون أكثر احتراماً للبيئة ، يُمكننا تقليل الأثر الكربوني لعمليات البناء من خلال استبدال الأسمنت جزئياً بمواد أخرى. في هذه الدراسة ، يكمن هدفنا الرئيسي في تسليط الضوء على مسحوق الزجاج المطحون بدقة واستخدامه كبديل جزئي للأسمنت في صياغة الخرسانة ذاتية الدمك. سندرس نسب مختلفة من استبدال مسحوق الزجاج ، وهي 15% ، 20% ، 25% ، 30%. هدفنا هو تقييم تأثير مسحوق الزجاج على خصائص الخرسانة ذاتية الدمك ، سواء في حالة الطزاجة أو في حالة الصلابة. اظهر استخدام مسحوق الزجاج في الخرسانة ذاتية الدمك كبديل جزئي للأسمنت بنسبة 30% ، نتائج جيدة في الأداء، خاصة فيما يتعلق بقابلية التشغيل والمتانة . بالنسبة لمقاومة الضغط في غضون 28 يوماً، فإنها رغم أنها أقل من المرجعية، إلا أنها لا تزال تظل قيماً قابلة للتقدير حيث تجاوزت قيمتها 32 ميجاباسكال. يجب تقييم هذه الخاصية على المدى الطويل، بعد مضي 90 يوم حيث أن خاصية التفاعل البوزولاني تبدأ بعد هذه الفترة

الكلمات المفتاحية: مسحوق الزجاج، الخرسانة ذاتية الدمك، المتانة، القوة، البيئة

Abstract

Cement is a widely used material in construction due to its strength and durability. However, cement production is a major source of carbon dioxide emissions. In the quest for more environmentally friendly alternatives, partial replacement of cement with other materials can help reduce the carbon footprint of construction. In this study, our main objective is to valorize finely ground glass powder by using it as a partial substitute for cement in the formulation of self-compacting concrete (SCC). We will examine different percentages of glass powder substitution, namely 15%, 20%, 25%, and 30%. Our aim is to assess the impact of glass powder on the properties of self-compacting concrete, both in its fresh and hardened states. The use of glass powder in self-compacting concrete as a partial substitute for cement at a dosage of 30% has shown good results in terms of performance, particularly in terms of workability and durability . Regarding compressive strengths at 28 days, while they may be lower than those of the control, they still remain at significantly higher values than 32 MPa. This characteristic should be evaluated in the long term, beyond 90 days, as the pozzolanic reaction becomes evident after this period.

Keywords : Glass powder, Self-compacting concrete, Durability, Strength, Environment

Résumé

Le ciment est un matériau largement utilisé dans la construction en raison de sa résistance et de sa durabilité. Cependant, la production de ciment est une source majeure d'émissions de dioxyde de carbone . En cherchant des alternatives plus respectueuses de l'environnement, il est possible de réduire l'empreinte carbone de la construction en remplaçant partiellement le ciment par d'autres matériaux. Dans cette étude, notre objectif principal est de valoriser la poudre de verre finement broyée en l'utilisant comme un substitut partiel du ciment dans la formulation du béton autoplaçant. Nous examinerons différents pourcentages de substitution de la poudre de verre, à savoir 15%, 20%, 25% et 30%. Notre objectif est d'évaluer l'impact de la poudre de verre sur les propriétés du béton autoplaçant, tant à l'état frais qu'à l'état durci. L'utilisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant en tant que substitut partiel du ciment à un dosage de 30%, a donné de bons résultats en termes de performances de manière générale, notamment en ce qui concerne l'ouvrabilité et la durabilité. Concernant les résistances à la compression à 28 jours, certes elles sont inférieures à celles du témoin, mais elles restent néanmoins à des valeurs appréciables supérieures à 32 Mpa. Cette caractéristique doit être évaluée à long terme, au-delà de 90 jours, car la réaction pouzzolanique se manifeste après cette période

Mots-Clés : Poudre de verre , Béton autoplacants , Durabilité , Résistance , Environnement.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction Générale	1
1 Le verre et la poudre de verre	20
1.1 Introduction	21
1.2 Caractéristique de verre	21
1.2.1 Caractéristiques chimiques	21
1.3 Caractéristiques physiques	22
1.4 Définition de la poudre de verre	24
1.5 Caractéristiques de la poudre de verre	24
1.5.1 Activité pouzzolanique de la poudre de verre	24
1.5.2 Effet de la couleur	25
1.5.3 Effet de l'oxyde de fer Fe_2O_3	25
1.5.4 L'effet de la taille des particules	26
1.6 Effet de la poudre de verre sur les propriétés des bétons à l'état frais	26
1.7 Effet de la poudre de verre sur les propriétés des bétons a l'état durci	27
1.7.1 Effetsur la résistance mécanique	27
1.7.2 Effet sur la perméabilité à l'eau	28
1.7.3 Effet sur la perméabilité au gaz	28
1.7.4 Effet sur la réaction Alkali-Silice	28
1.7.5 Effet sur le retrait de séchage	29
1.8 Conclusion	29
2 Généralités sur les BAP	30
2.1 Introduction	31
2.2 Généralités	31
2.3 Les principaux constituants des BAP	32
2.3.1 Les granulats	33
2.3.2 Le Ciment	34
2.3.3 Les ajouts minéraux	34

2.3.4	L'eau de gachage	35
2.3.5	Adjuvants chimiques	35
2.4	Approches de formulation	37
2.4.1	Approche japonaise [Okamura et Ouchi, 2003]	38
2.4.2	Approche Française	38
2.4.3	Approche Suédoise	39
2.4.4	Approche Nord-Américaine	39
2.4.5	Méthode de mortier de béton équivalent (MBE)	40
2.5	Conclusion	40
3	Caractéristiques des BAP	41
3.1	Introduction	42
3.2	Caractérisations des BAP À L'état frais	42
3.2.1	Essai de l'étalement	42
3.2.2	Essai de V funnel	43
3.2.3	Essai de la boîte en L	44
3.2.4	Essai de stabilité au tamis	45
3.3	Caractérisations des BAP à l'état durci	45
3.3.1	La résistance à la compression	46
3.3.2	La résistance à la traction	46
3.3.3	Module d'élasticité	46
3.3.4	Déformations et fluage	47
3.3.5	Le retrait	47
3.3.6	Résistance de gel-dégel	48
3.3.7	Perméabilité a l'eau	49
3.4	Conclusion	49
4	La poudre de verre et le béton autoplaçant	50
4.1	Introduction	51
4.2	Influence de la poudre de verre sur les caractéristiques du BAP A l'état frais	51
4.2.1	Influence de la poudre de verre sur l'Etalement	51
4.2.2	Influence de la poudre de verre sur le taux de remplissage	52
4.2.3	Influence de la poudre de verre sur le T50	53
4.2.4	Influence de la poudre de verre sur la Résistance à la ségrégation	54
4.3	Influence de la poudre de verre sur les caractéristiques du BAP A l'état durci	55
4.3.1	Influence de la poudre de verre sur la résistance a la compression	55
4.3.2	Influence de la poudre de verre sur la résistance à la flexion	56
4.3.3	Influence de la poudre de verre sur le module d'élasticité	56
4.4	Conclusion	57
5	Méthodes expérimentales exploitées	58
5.1	Introduction	59
5.2	Essais sur les sables	59
5.2.1	Essai de l'analyse granulométrique par tamisage [NA 2607]	59
5.2.2	Essai de l'équivalent de sable [NA 455]	60
5.2.3	Essai de bleu de méthylène [NA 1948]	60

5.2.4	Essai de masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau [NF EN 1097-6]	61
5.3	Essais sur les graviers	62
5.4	Essais sur ciments	62
5.4.1	Essai de la Surface Spécifique Blaine « SSB » [EN 196-6]	62
5.4.2	Essai de refus à 45 µm [ASTM C430]	63
5.4.3	Essai de la masse volumique absolue [ASTM C188]	64
5.5	Formulation des BAP	64
5.5.1	Choix de dosage des granulats (Méthode de compacité)	64
5.5.2	Choix de dosage d'eau et de superplastifiant	65
5.6	Essais sur le BAP à l'état durci	66
5.6.1	Essai de la résistance à la compression (EN 12390-3)	66
5.6.2	Essai de la perméabilité au gaz (méthode de Cembureau)	66
5.6.3	Essai de la perméabilité à l'eau (prEN 12364)	67
5.6.4	Essai de retrait [ASTM 157/157M]	68
5.6.5	Essai d'absorption capillaire [ASTM C1585]	68
5.7	Conclusion	69
6	Matériaux utilisés	70
6.1	Introduction	71
6.1.1	Le verre et la poudre de verre	71
6.2	Ciments	71
6.3	Graviers	72
6.4	Sables	72
6.5	L'adjuvant	73
6.6	Conclusion	73
7	Résultats et interprétations	74
7.1	Introduction	75
7.2	Essai des sur les sables	75
7.3	Essais sur les gravier	75
7.4	Essais sur ciments	76
7.5	Formulation et essais sur BAP	77
7.5.1	Optimisation de dosage sables et des graviers	77
7.5.2	Optimisation du dosage d'eau et d'adjuvant	79
7.5.3	Formules des BAP	80
7.5.4	Essai d'étalement	80
7.5.5	Essai de V funnel	81
7.5.6	Essai de la boîte en L	82
7.5.7	Essai de la stabilité au tamis	83
7.5.8	Essai de la résistance a la compression	84
7.5.9	Essai de l'absorption capillaire	85
7.5.10	Essai de la perméabilité à l'eau	86
7.5.11	Essai de la Perméabilité au gaz	86
7.5.12	Essai de retrait	87
7.6	Conclusion	88
	Conclusion Générale	89

Liste des tableaux

1.1	Les déchets de verre et le taux de recyclage dans différents pays [Jani et al, 2014] . . .	21
1.2	Composition chimique du ciment et des différents types de verres colorés. [Jani et al, 2014]	22
1.3	Affaissement des bétons contenant de la poudre de verre en fonction de la finesse de la PV [Amroun, 2022]	27
2.1	Différents types d'adjuvants pour béton [Baron et Ollivier, 1999]	36
3.1	Essai sur le BAP a l'état frais	42
3.2	Les valeurs recommandées pour les essais à l'état frais [AFGC]	45
4.1	Résultat de l'étalement [Roy et al ,2017]	52
5.1	Essais sur les graviers	62
6.1	Caractéristiques chimiques du ciment	72
6.2	Différents ciments confectionnés	72
6.3	Caractéristiques du superplastifiant	73
7.1	Résultats des essais sur le sable	75
7.2	Résultats des essais sur les graviers	76
7.3	Résultats des essais sur le ciment	77
7.4	Optimisation du dosage des sables	77
7.5	Optimisation du dosage des graviers	78
7.6	Formulations des mortiers	79
7.7	Les différents BAP formulés	80

Table des figures

1.1	Les applications du verre dans le domaine de la construction	23
1.2	Les possibilités de l'utilisation de produits en béton avec verre dans la construction [LEGHREIB et Mekki 2015]	24
1.3	Activité pouzzolanique du verre dans différentes conditions [Bencheikh,2016]	25
1.4	Résultats d'essai d'expansion sur éprouvettes de mortiers avec du verre [Meyer et Bexter,1997]	26
1.5	Résistance à la compression des bétons à 56 et 91 jours [Zidol 2009]	28
2.1	Évolution du développement des BAP. [Rebbouh ,2006].	31
2.2	Composition et aspect à l'état frais d'un béton ordinaire (BO) et d'un (BAP) , [Turcry, 2004].	33
2.3	Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [Sedrane 1999].	34
2.4	Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [Sedrane 1999].	37
2.5	Critères de base pour assurer une bonne déformabilité, une stabilité acceptable et un faible risque de blocage [Khayat, 1999].	38
3.1	Essai d'étalement	43
3.2	Schéma du V Funnel	44
3.3	Essai de la boîte en L	44
3.4	Essai de stabilité au tamis	45
3.5	Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [Gibbs, 1999].	46
3.6	Retrait plastique des formules de BAP et de BV, [Turcry 2004]	47
3.7	Retrait plastique de BAP et de BV de structure (T = 20°C, 50% HR) [Gram et al,1999]	48
3.8	Perte de masse de deux BAP et d'un béton vibré pendant un test d'écaillage [Assié 2004]) [Gram et al,1999]	49
4.1	Influence du dosage en addition sur l'étalement [Boucetta et al ,2013].	51
4.2	Résultats de l'essai de la boîte en L [Boucette et Behim,2013]	52
4.3	Résultats de l'essai de la boîte en L [Boucetta et Behim,2013]	53
4.4	Mesure de T50 En fonction de la quantité de la PV ajoutée, [Boucetta et Behim ,2013]	53
4.5	Influence de la poudre de verre sur T50 [Roy et al ,2017]	54
4.6	Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis [Boucette et Behim, 2017]	54
4.7	, Influence des pourcentages de poudre de verre sur la résistance à la compression des BAP [Vanjare et al , 2012]	55

4.8	, Influence des pourcentages de poudre de verre sur la résistance à la compression des BAP [Roy et Kumar ,2017]	55
4.9	Influence des pourcentages de poudre de verre sur la résistance à la flexion des BAP [Roy et Kumar ,2017]	56
4.10	Influence des pourcentages de poudre de verre sur la résistance à la flexion des BAP [Vanjare et al , 2012]	56
4.11	Influence des pourcentages de poudre de verre sur le module d'élasticité des BAP [Chekireb, 2015]	57
5.1	Tamisage de sable	59
5.2	Essai de l'ES	60
5.3	Agitateur électrique	60
5.4	Essai de Blue de méthylène	61
5.5	Sable 0/4 dans le pycnomètre	62
5.6	Sable 0/1 dans le pycnomètre	62
5.7	perméabilimètre blaine	63
5.8	Appareillage de l'essai reufs à 45µm	63
5.9	masse du pycnomètre rempli de toluène	64
5.10	Un mélange composé de 90% de sable 0/4 et de 10% de sable 0/1 dans un réceptacle	65
5.11	Écrasement des éprouvettes	66
5.12	Éprouvette de béton dans la chambre du dispotif	67
5.13	Éprouvette de béton après surfacage	67
5.14	Appareillage	67
5.15	Essai fendage des eprouvettes	67
5.16	Mesure de la profondeur de pénétration	68
5.17	Essai de retrait	68
5.18	Éprouvette résinée immergé dans l'eau	69
6.1	Bouteilles de verre	71
6.2	Broyeur à boulets	71
6.3	Poudre de verre, SSB=7000 cm ² /g,	71
6.4	Gravier 3/8	72
6.5	Gravier 8/15	72
6.6	Sable0/1	73
6.7	Sable 0/4	73
7.1	Courbes granulométriques des sables et des graviers	76
7.2	Optimisation du dosage des sables	78
7.3	Optimisation du dosage des graviers	79
7.4	Variation de l'étalement des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre	81
7.5	Variation de l'écoulement des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.	82
7.6	Variation du taux de remplissage des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.	83
7.7	Variation de la résistance a la ségrégation des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.	84
7.8	Variation de la résistance a la compression des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.	85

7.9	Variation de l'absorption capillaire des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.	85
7.10	Variation de la Pénétrabilité a l'eau des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.	86
7.11	Variation de la Perméabilité au gaz des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.	87
7.12	Variation de retrait des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.	88

Liste des abréviations

ASR : Alkali-Silica Reaction

BAP : Béton autoplaçant

BV : Béton vibré

CSH : Silicates de Calcium Hydratés

ES : Equivalent de sable

SS : Surface Spécifique

SSB : Surface Spécifique Blaine

TF : Taux de fines

PV : Poudre de verre

VB : Valeur de bleu

Introduction Générale

Problématique

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton spécial développé dans le but d'accélérer le processus de coulage et d'améliorer la qualité des structures, grâce à sa fluidité, son homogénéité et sa stabilité. Ce béton permet d'obtenir une finition lisse et uniforme en améliorant la sécurité et en réduisant les coûts de main-d'œuvre.

Pour obtenir ces caractéristiques, le BAP nécessite une demande relativement élevée, en liant et en adjuvants chimiques, ce qui implique une formulation coûteuse et aussi une exploitation des ressources naturels.

Des professionnels du domaine du génie civil et de l'industrie de la construction à travers le monde, ont proposé des idées et des options alternatives, visant à réduire l'impact environnemental significatif de l'utilisation des matériaux naturels. Parmi ces solutions nous avons les ajouts cimentaires, tels que la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes, en remplacement partiel du ciment, il existe aussi d'autres produits alternatifs ayant un potentiel pouzzolanique, tel que la poudre de verre (PV).

Objectifs de projet de recherche

L'objectif de notre projet de recherche est la valorisation de la PV dans l'industrie du BAP . Elle sera utilisée en tant que substitut partiel du ciment, contribuant ainsi à la fabrication d'un mélénage à bas carbone et à la protection de l'environnement grâce à l'exploitation des déchets, notamment les déchets de verre.

Ce qui a motivé le choix de cette thématique de recherche est notre espoir d'utiliser la poudre de verre comme un substitut efficace du ciment dans les applications de construction, en explorant ses avantages et ses performances en tant que matériau de construction.

Une fois les objectifs spécifiques atteints, les résultats peuvent aider à fournir des informations utiles pour les ingénieurs et les concepteurs de bâtiments qui cherchent des alternatives durables au ciment conventionnel.

Cet étude vise à étudier l'influence de la poudre de verre sur le béton autoplaçant , sur le plan mécanique , rhéologique et sur la durabilité , en formulant un béton autoplaçant avec une substitution partielle du ciment par la poudre de verre à plusieurs pourcentages (15%-20%-25%-30%) .

Plan de mémoire

Ce mémoire se compose de 7 chapitres. Le premier chapitre présente les caractéristiques du verre et de la poudre de verre, ainsi que l'influence de la PV sur les propriétés du béton. Le deuxième chapitre se concentre sur le BAP, en abordant sa définition, son historique, ses avantages et les différentes méthodes de formulation. Le troisième chapitre met en évidence les caractéristiques du BAP à l'état frais et à l'état durci, en soulignant ses avantages . Le quatrième chapitre présente les résultats des études sur l'utilisation de la poudre de verre dans le BAP, tant au niveau de l'état frais que de l'état durci. Le cinquième chapitre détaille les essais réalisés dans cette étude, portant sur

les ciments, les granulats et le BAP. Le sixième chapitre se concentre sur les différents matériaux utilisés dans cette étude. Enfin, le septième chapitre analyse les résultats obtenus et propose des interprétations pour mieux comprendre l'influence de la poudre de verre sur les propriétés du béton autoplaçant

Chapitre 1

Le verre et la poudre de verre

1.1 Introduction

Le verre est un matériau produit en fondant un mélange de sable siliceux, de chaux ou de soude à haute température pour obtenir un matériau transparent et fragile. Il est largement utilisé depuis des siècles, mais son recyclage est devenu crucial en raison des quantités importantes de verre non recyclé qui finissent dans les décharges ou dans la nature.

Le tableau 1.1, donne une indication du volume de déchets de verre générés par plusieurs pays, ainsi que du pourcentage de ces déchets qui ont été effectivement recyclés. .

TABLE 1.1 – Les déchets de verre et le taux de recyclage dans différents pays [Jani et al, 2014]

Pays	Déchets de verre (tonne)	Pourcentage du taux de recyclage (%)	Année
États-Unis	11 500 000	27	2010
Canada	116 000	68	2009
Singapour	72 800	29	2010
Portugal	493 000	25	2001
Turquie	12 000	66	2004
Allemagne	3 200 000	94	2003

1.2 Caractéristique de verre

1.2.1 Caractéristiques chimiques

Certains éléments peuvent être transformés en verre à cause de leur combinaison avec l'oxygène. Le dioxyde de silicium (SiO_2), présent dans le sable, est l'élément le plus courant dans la composition du verre. Environ 70% de SiO_2 est généralement présent dans le verre ordinaire. Les différents déchets de verre de couleurs différentes, ont une composition chimique qui contient une importante quantité de silicate, et une quantité appréciable de calcium, comme indiqué dans le tableau 1.2, grâce à sa structure amorphe, le verre peut être utilisé comme pouzzolane ou comme matériau cimentaire.

TABLE 1.2 – Composition chimique du ciment et des différents types de verres colorés. [Jani et al, 2014]

Composition chimique	Ciment %	Verre transparent %	Verre ambré %	Verre vert %	Verre concassé %	Poudre de verre %	Sable %
SiO_2	20.2	72.42	72.21	72.38	72.61	72.20	78.6
Al_2O_3	4.7	1.44	1.37	1.49	1.38	1.54	2.55
CaO	61.9	11.50	11.57	11.26	11.70	11.42	7.11
Fe_2O_3	3.00	0.07	0.26	0.29	0.48	0.48	2.47
MgO	2.60	0.32	0.46	0.54	0.56	0.79	0.46
Na_2O	0.19	13.46	13.75	13.75	13.52	12.85	0.42
K_2O	0.82	0.35	0.20	0.27	0.38	0.43	0.64
SO_3	3.9	0.21	0.1	0.07	0.09	0.09	-
TiO_2	-	0.035	0.041	0.04	-	-	0.15
Perte au feu	1.9	-	-	-	0.22	0.36	7.6

Les types de verre mentionnés dans le tableau précédant présentent des compositions chimiques distinctes qui déterminent leurs propriétés . Par exemple le verre transparent est généralement utilisé pour les vitres et les fenêtres. Le verre ambré présente des caractéristiques similaires, mais avec une légère variation dans sa composition, il est fréquemment utilisé dans la fabrication de bouteilles pour protéger les produits sensibles à la lumière. Nous avons aussi le verre vert qui est utilisé pour la production de bouteilles et de récipients en verre. Le verre concassé, présente une composition similaire au verre transparent. Il est utilisé comme agrégat dans la construction. et enfin la poudre de verre, obtenue en broyant le verre en une fine poudre, est utilisée comme additif dans les matériaux de construction.

1.3 Caractéristiques physiques

Le verre est un matériau aux propriétés physiques fascinantes, il peut être transparent ou opaque. Sa dureté est remarquable, car seuls les diamants et le carbure de tungstène peuvent le rayer. Le verre de Bohème est le plus dur tandis que le cristal est le plus tendre. Sa densité dépend de sa composition et est généralement d'environ 2,5 g/cm³. Bien qu'il soit très résistant à la compression et qu'il faille une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre, il est fragile et se brise facilement sous l'effet de la flexion et des chocs. Enfin, le verre est extrêmement imperméable, mais reste poreux pour certains liquides tels que le kérosène [Ladacyia et Righi , 2020] .

En raison de propriétés citées précédemment, le verre est devenu en ces dernières années un matériau de plus en plus utilisés dans le domaine de construction, il peut être utilisé de différentes manières, que ce soit comme matériau de construction, pour la décoration, ou encore pour l'isolation thermique des bâtiments.

La Figure 1.1 présente les différentes utilisations du verre dans la construction. Il est largement utilisé en construction en raison de ses propriétés esthétiques uniques. La transparence de verre permet de laisser entrer la lumière naturelle, créant ainsi des espaces lumineux et ouverts. De

plus, le verre est durable et résistant aux intempéries, ce qui en fait un matériau idéal pour une utilisation en extérieur.



FIGURE 1.1 – Les applications du verre dans le domaine de la construction

Le recyclage de verre dans la construction se fait selon plusieurs méthodes, (Figure. 1.2), en fonction des besoins en termes de taille des particules et de leurs applications spécifiques. Le calcin de verre de 10 mm présente deux utilisations principales dans le domaine de la construction il peut servir d'agrégat décoratif dans le béton, offrant ainsi une esthétique unique grâce à sa texture. De plus, le calcin de verre de 10 mm peut également remplacer les granulats naturels dans le béton. Nous avons aussi, le calcin de verre de 5 mm est souvent utilisé comme substitut du sable dans les mortiers, les bétons auto-compactants et les revêtements de surface. Pour notre projet de recherche, nous nous concentrons spécifiquement sur le broyage du verre pour obtenir de la poudre de verre. Cette poudre fine peut ensuite être utilisée comme substitut partiel du ciment dans les mélanges de béton.

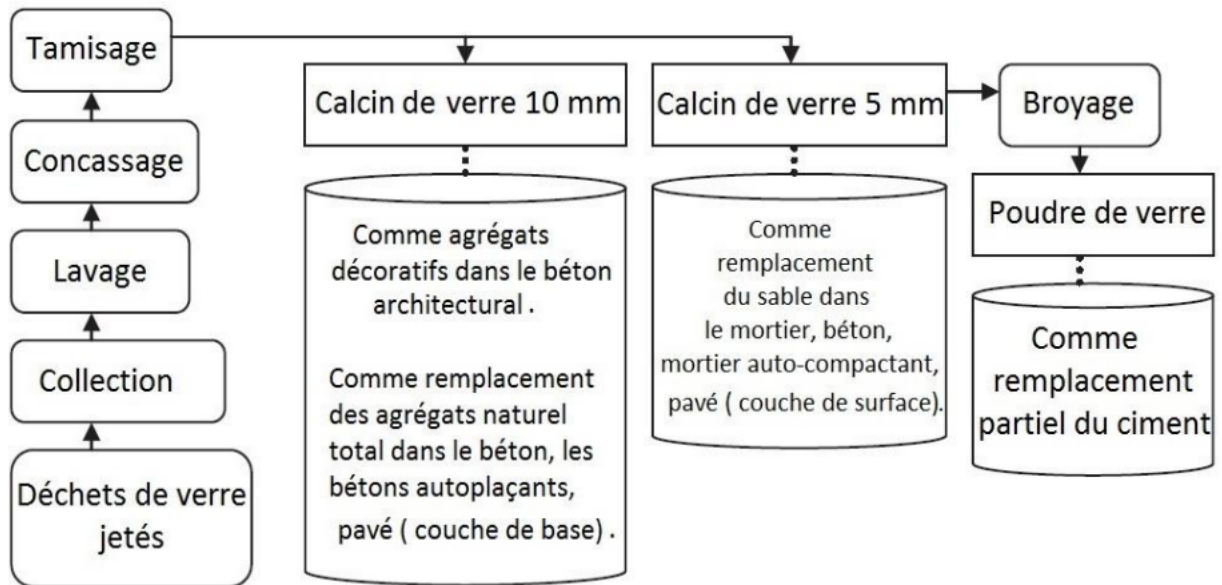


FIGURE 1.2 – Les possibilités de l’utilisation de produits en béton avec verre dans la construction [LEGHREIB et Mekki 2015]

1.4 Définition de la poudre de verre

La poudre de verre est un matériau non absorbant produit par le broyage de déchets de verre. Ce matériau peut être utilisé comme additif dans le ciment.

La présence élevée de silice amorphe SiO_2 dans ce matériau lui confère des propriétés pouzzolaniques. En réagissant avec la chaux, il forme d’autres hydrates qui contribuent à l’amélioration des performances mécaniques des mélanges. [Saribiyik et al, 2013].

L’utilisation de la poudre de verre comme un matériau de construction, offre plusieurs avantages, on peut citer :

- L’amélioration des propriétés mécaniques du ciment grâce à son taux élevé de silice amorphe
- L’ajout de poudre de verre permet de donner une nouvelle vie aux déchets de verre en les valorisant.
- La réduction des volumes de déchets de verre destinés aux décharges.
- La réduction de la quantité de ciment nécessaire dans la formulation de béton, ce qui réduit l’empreinte carbone de ce matériaux

1.5 Caractéristiques de la poudre de verre

1.5.1 Activité pouzzolanique de la poudre de verre

Une réaction pouzzolanique est le résultat de l’interaction entre un matériau siliceux amorphe (tel el que la poudre de verre), et l’hydroxyde de calcium. Cette réaction conduit à la formation

d'hydrates de silicate de calcium (C-S-H) comme produit principal. La poudre de verre peut déclencher une réaction pouzzolanique grâce à sa teneur relativement élevée en silice [SHI et al ,2005].

La figure suivante , (Figure 1.3) présente une compilation des résultats de plusieurs études menées entre 2000 et 2008 portant sur l'activité pouzzolanique du verre.

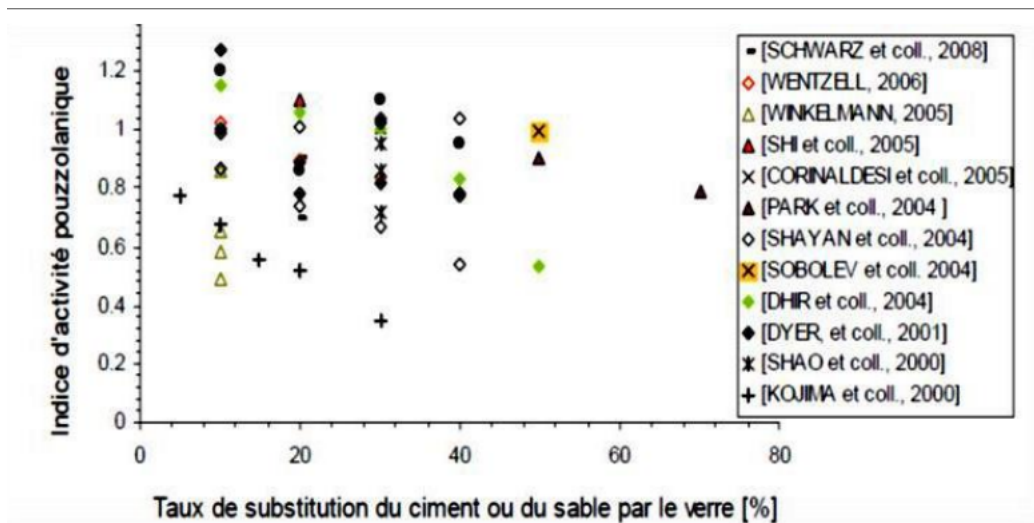


FIGURE 1.3 – Activité pouzzolanique du verre dans différentes conditions [Bencheikh,2016]

L'indice d'activité pouzzolanique, mesuré pour toutes les recherches, est supérieur à 0,3, indépendamment du taux de substitution de ciment ou de sable par du verre. La variation de l'indice d'activité pouzzolanique est attribuable à plusieurs facteurs, tels que la finesse de la poudre de verre utilisée.

Dans une étude réalisée par [Schwarz et Neithalath, 2007], ils ont constaté que la poudre de verre fine présente des niveaux de pouzzolanité égaux ou supérieurs à ceux des cendres volantes.

Ces résultats ont également été confirmés par [Zeroub et al, 2015], ils ont trouvé que la PV possède une activité pouzzolanique similaire à celle des cendres volantes.

1.5.2 Effet de la couleur

Le verre de couleur verte présente une réactivité pouzzolanique plus élevée que les autres couleurs de verre. Cela peut être attribué aux éléments de coloration qui participent à la réaction pouzzolanique et aux différences structurelles entre les verres [Karamberiet et Moutsatsou, 2005] . Cependant, l'étude menée par [Özkan et Yüксе,2008] a conclu que l'influence de la couleur sur le verre, n'est pas significative.

1.5.3 Effet de l'oxyde de fer Fe_2O_3

Une étude menée par [Meyer et Bexter ,1997], a prouvé que l'augmentation de la teneur en Fe_2O_3 dans le PV de 0,05% à 2%, réduit l'expansion de 85%. Donc l'oxyde de fer Fe_2O_3 a un effet bénéfique dans le verre (figure 1, 4)

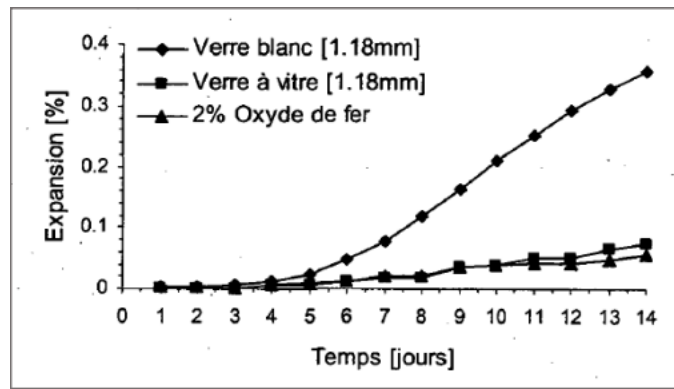


FIGURE 1.4 – Résultats d’essai d’expansion sur éprouvettes de mortiers avec du verre [Meyer et Bexter,1997]

1.5.4 L’effet de la taille des particules

Selon la taille des particules de verre utilisées dans le béton, deux comportements contradictoires peuvent être observés :

- La réaction alcali-silice, qui a un effet nocif sur le béton.
- la réaction pouzzolanique, qui améliore les propriétés du béton.

Selon la norme ASTM C618, les dimensions des particules de la PV, ont une influence direct sur l’activité pouzzolanique. Pour que la poudre de verre puisse déclencher une réaction pouzzolanique, la dimension maximale des particules doit être inférieure ou égale à 38 μm .

La poudre de verre quand elle est fine , elle peut modifier la concentration des ions hydroxyde dans les pores de la matrice, ce qui est considéré comme étant la cause principale de la réduction du risque d’expansion due à l’ASR. [Zeroub et al, 2015] .

1.6 Effet de la poudre de verre sur les propriétés des bétons à l’état frais

La finesse de la poudre de verre utilisée dans le béton joue un rôle important dans l’obtention d’une ouvrabilité acceptable. En effet, une poudre de verre d’une finesse similaire à celle du ciment est optimale pour obtenir une ouvrabilité acceptable pour le béton, [Zidol,2009].

L’utilisation de particules de poudre de verre de taille relativement grande , entraine une diminution de l’affaissement au cône d’Abram dans les bétons. Cela est dû à la taille importante ainsi que l’irrégularité de la poudre de verre [Lu et al , 2017].

Cependant, des recherches menées par [Schwartz et al,2017] ont trouvé que l’utilisation de la poudre de verre de grande taille comme un substitut, avec un pourcentage de 60% peut entraîner une augmentation de l’affaissement du béton

Pour la demande en supersplastifiant , il est constaté que plus le pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre augmente, plus la quantité de superplastifiant nécessaire diminue

[Zidol, 2009]. Ce qui démontre l'effet positif de la poudre de verre sur l'ouvrabilité des mélanges.

Le tableau 1.3 résume les résultats obtenus à partir de différentes expériences portant sur l'impact de la poudre de verre sur l'affaissement de béton.

TABLE 1.3 – Affaissement des bétons contenant de la poudre de verre en fonction de la finesse de la PV [Amroun, 2022]

Référence	Finesse	Substitutions (%)	Affaissement
Lu et al. (2017)	60% des particules ont un diamètre inférieur à 88 μm	0-30%	Augmentation
Taha et Nounu (2009)	Moyenne 45 μm	20%	Pas de différence majeure
Shayn et Xu (2006)	88% des particules ont un diamètre inférieur à 10 μm	20%, 30%	Diminution

1.7 Effet de la poudre de verre sur les propriétés des bétons a l'état durci

1.7.1 Effetsur la résistance mécanique

Les recherches ont démontré qu'on peut remplacer partiellement le ciment avec la poudre de verre jusqu'à 30%. Ce remplacement peut augmenter la résistance mécanique a long terme. On peut citer les recherches menées par [Soroushian et al , 2012], ils ont trouvé comme résultat que l'utilisation de poudre de verre finement broyée ($SSB = 13100 \text{ cm}^2/\text{g}$), a augmenté la résistance à la compression a long terme des béton et même des mortiers. Ainsi que [Zidol ,2009] , qui a trouvé que les bétons contenant de la PV ont développé des résistances équivalentes, voire supérieures, à celles des bétons ordinaires à 56 jours et 91 jours, (figure 1.5).

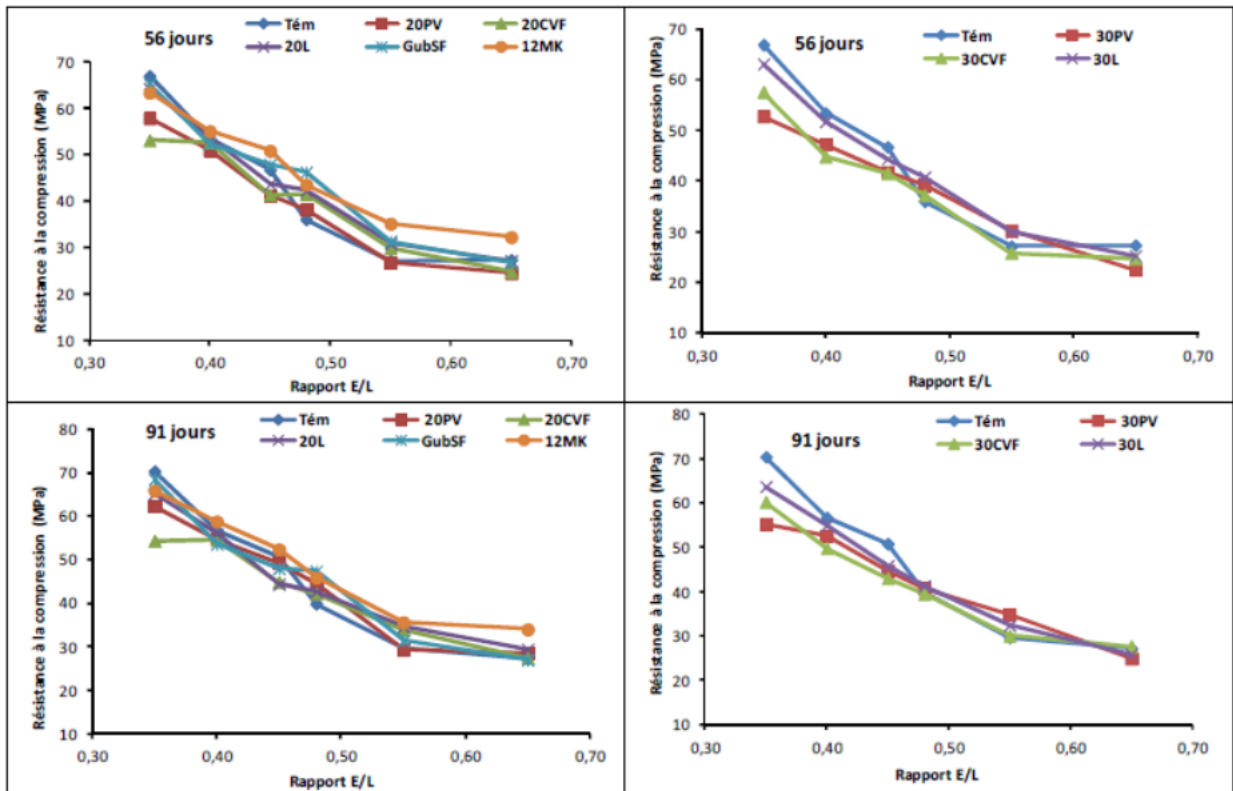


FIGURE 1.5 – Résistance à la compression des bétons à 56 et 91 jours [Zidol 2009]

1.7.2 Effet sur la perméabilité à l'eau

L'ajout de 20% de poudre de verre finement broyée dans le béton a entraîné une réduction de sa perméabilité à l'eau [Shayan et al., 2004], les mêmes résultats ont été trouvés suite à une étude menée par [Du et Tan, 2013], ils ont conclu qu'un ajout de la poudre de verre compris entre 15% et 60% par substitution, peut entraîner une diminution de la pénétrabilité à l'eau comprise entre 54% et 80%.

1.7.3 Effet sur la perméabilité au gaz

L'ajout de la poudre de verre à 30% dans le béton entraîne une diminution significative de la porosité, ce qui résulte en un béton plus dense, créant un environnement imperméable qui limite la circulation des fluides à l'intérieur du béton [Hamid, Al 2015].

1.7.4 Effet sur la réaction Alkali-Silice

La réaction alcali-silice (ASR) peut poser des problèmes lors de l'utilisation de verre comme ajout dans le béton avec des tailles de particules supérieures à 1,2-1,5 mm, mais des études ont montré que le verre finement broyé ne contribue pas à l'ASR [Shi C et al., 2004], [Schwartz et al., 2009].

Une étude menée par [SHI et coll., 2004] confirme que le remplacement du ciment par 20% de poudre de verre peut permettre une réduction de plus de 50% de l'expansion par rapport à un mortier de référence.

Ce résultat a été affirmé par [Zidol, 2009]. Ce dernier a constaté que l'utilisation de la poudre de verre dans le béton comme un ajout cimentaire, réduit la réaction alcali silice.

1.7.5 Effet sur le retrait de séchage

L'utilisation des ajouts cimentaires en teneurs élevées dans le béton, peut entraîner une augmentation du retrait de béton. [Neville, 2000].

Cependant [Shayan et Al, 2004] ont fait une étude sur l'impact de la poudre de verre en substitution de ciment sur le retrait du béton, Les résultats ont montré que le retrait était inférieur à la limite fixée par la norme australienne, qui est de 0,075% à 56 jours .

1.8 Conclusion

L'utilisation de la poudre de verre dans le béton offre plusieurs avantages. D'une part l'utilisation de la PV dans le béton permet de réduire la quantité de ciment nécessaire, ce qui réduit les émissions de (CO_2) produites lors de sa fabrication. Donc on peut dire que l'utilisation de la poudre de verre dans le domaine de construction contribue à la protection de l'environnement.

D'autres parts, plusieurs études ont montré que l'utilisation de la poudre de verre en tant qu'ajout cimentaire dans le béton peut améliorer sa qualité et ses propriétés. A l'état frais l'influence de la poudre de verre sur les caractéristiques du béton dépend de la composition du mélange et de la surface spécifique Blaine de poudre de verre ajouté.

En ce qui concerne l'état durci, l'ajout de la PV peut augmenter la résistance à la compression a long terme grace a son activité pouzzolanique . Par ailleurs, l'utilisation de la poudre de verre peut entrainer des augmentation de retrait de séchage du béton, dont les valeurs restent acceptables et inférieures aux seuils préconisés par les normes.

La poudre de verre peut aussi réduire la perméabilité du béton. Ce qui réduit la pénétration de l'eau et des ions, cela peut augmenter la résistance et améliorer la durabilité globale du béton.

Chapitre 2

Généralités sur les BAP

2.1 Introduction

Dans l'industrie de la construction il existe différents types de béton utilisés, tel que le béton autoplaçant . Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique portant sur le ce béton . Cette partie aborde la définition, l'historique et les avantages de ce matériau, ainsi que les différentes approches de formulation.

2.2 Généralités

Au fil des années, les structures architecturales ont de plus en plus des formes complexes et des courbures multiples, ce qui rend l'utilisation du béton traditionnel très difficile . Afin de s'adapter à cette variabilité de formes, les chercheurs en génie civil ont développé des formulations des béton très ouvrables, avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité. Ces bétons sont appelés les bétons autoplaçants (BAP), ou bétons auto-compactant ou encore 'Self Consolidating Concrete' (SCC). L'application du BAP a été introduit pour la première fois à la fin des années 1980 par des chercheurs de l'Université de Tokyo [Okamura et Ouchi, 2003].

A la fin des années quatre-vingt-dix on vit apparaître les premières applications du BAP en Europe et en Amérique du Nord. En France, Le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) a commencé à examiner cette question, mais les premières mises en œuvre en taille réelle ont été déjà effectuées au début de 1988 à Brest, sur le chantier d'extension du parc de loisirs Océan Polis pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferrailés, [Domone, 2006]. L'évolution du développement des BAP est présentée dans la figure ci-dessous (Figure 2.1) .

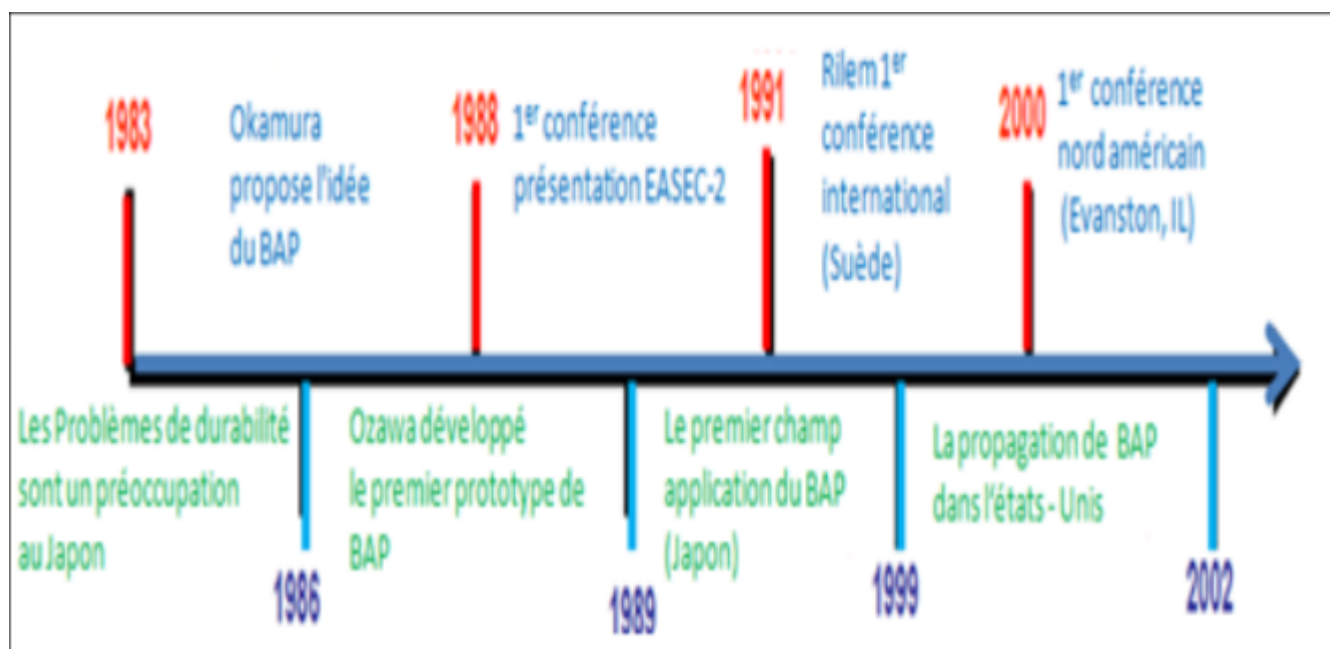


FIGURE 2.1 – Évolution du développement des BAP. [Rebbouh ,2006].

Le béton autoplaçant est un béton spécial, très fluide qui s'écoule sous son propre poids sans vibration, et reste homogène au cours l'écoulement et une fois mis en place (absence de ségrégation

dynamique et statique). Sa spécificité réside dans son comportement à l'état frais. En effet ce type de béton se caractérise par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en restant stable.

Le BAP se distingue de béton ordinaire par ses propriétés à l'état frais, puisqu'il peut se mettre en place sous l'effet de son propre poids, sans intervention extérieure, dans des coffrages aussi confinés qu'ils soit. Il reste homogène au cours de l'écoulement sans présence de ségrégation une fois sur place [Serdane,1999].

Le BAP est connu sous plusieurs noms tels que béton auto-consolidant ou béton auto-nivelant pour les applications horizontales mais , il est le plus souvent appelé béton autoplaçant, abrégé en BAP.

Les industriels s'intéressent de nouveau à ces bétons en raison de leurs multiples avantages, on peut citer :

- Une bonne régularité de surface.
- Bon remplissage des coffrages et enrobage des armatures adéquat sans vibration.
- Une amélioration des qualités de parement.
- Réduction des dépenses liées à la main-d'œuvre.
- Réduction des délais de réalisation

Le défi actuel est de formuler du béton autoplaçant dans différentes classes de résistance, tout en respectant un budget compétitif, en restant économiquement viable et réalisable avec les ressources disponibles.

2.3 Les principaux constituants des BAP

Les granulats et le ciment utilisés dans la production de BAP sont similaires à ceux utilisés pour le béton conventionnel. Ce qui différencie la composition des BAP de celle du béton ordinaire, est la proportion relative des différents constituants (l'ajout de composés chimiques et/ou minéraux spécifiques.), et non leurs propriétés intrinsèques. [Turcry,2004]. (La figure 2,2), présente la différence entre le BAP et le BO en terme de composition.

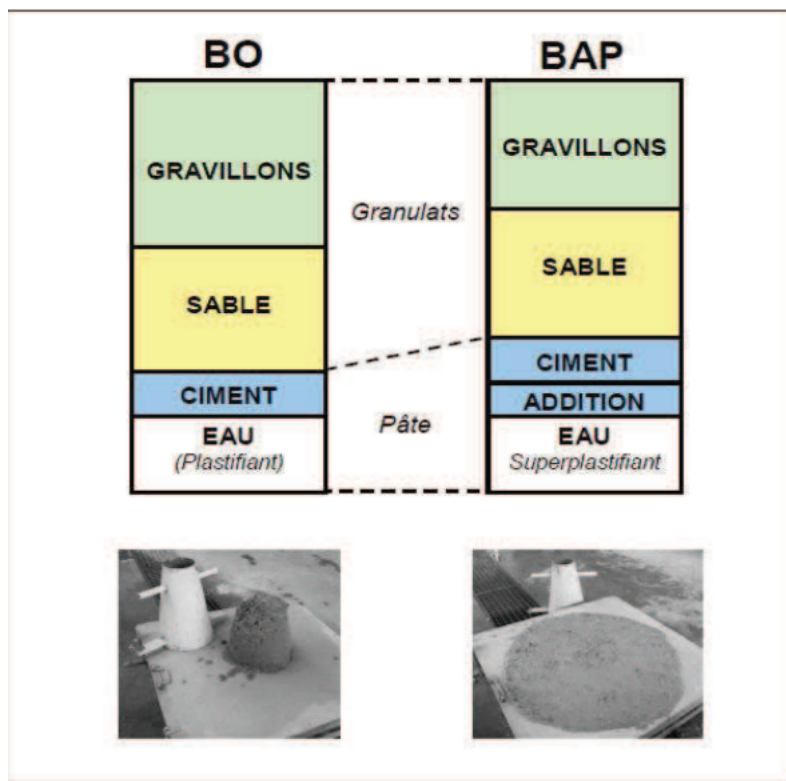


FIGURE 2.2 – Composition et aspect à l'état frais d'un béton ordinaire (BO) et d'un (BAP) , [Turcry, 2004].

2.3.1 Les granulats

Les granulats utilisés pour la fabrication des BAP peuvent être roulés ou concassés, mais leur forme a une incidence sur le comportement rhéologique. Les granulats roulés présentent un vide intergranulaire plus petit, nécessitant une plus petite quantité de pâte de ciment pour le remplir. Pour le sable, il est préférable d'utiliser du sable concassé en raison du problème de surexploitation des gisements et de la capacité du sable concassé à apporter une part non négligeable de fines pour améliorer la maniabilité, la compacité, la résistance et la durabilité du béton. En général, pour éviter tout blocage lors du coulage, le diamètre maximal des granulats est limité à 16 mm. [Domone ,2006].

Le volume des gravillons doit être limité par ce que les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, (Figure 2,2) , L'augmentation de ce volume réduit la quantité de liant nécessaire ce qui provoque une diminution de l'ouvrabilité, [Sedrane 1999].

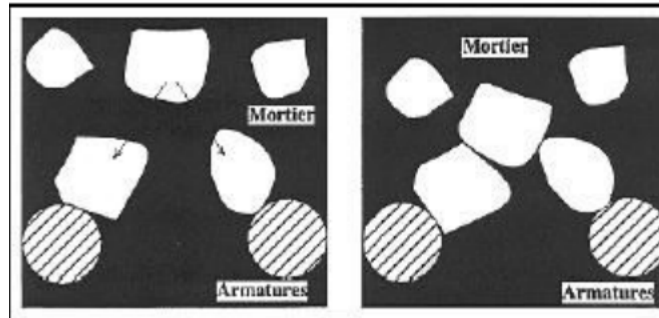


FIGURE 2.3 – Phénomène de blocage des granulats au droit d’un obstacle [Sedrane 1999].

2.3.2 Le Ciment

Le choix du ciment pour la fabrication de BAP doit prendre en compte les exigences de résistance, de maniabilité, de temps de prise, de durabilité et de coût, ainsi que la disponibilité et les caractéristiques locales des matériaux. L’utilisation de ciment portland (contenant uniquement du clinker) permet plus de flexibilité pour varier et contrôler les quantités d’additions minérales introduites dans le mélange.

2.3.3 Les ajouts minéraux

Selon la norme européenne ENV 206 un ajout minéral est un matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières.

L’utilisation des ajouts minéraux a des bénéfices : fonctionnels, économiques et écologiques [ABIB 2004], Parmi ces avantages nous avons :

- La quantité de chaleur générée pendant le processus de fabrication du béton a un impact sur le niveau de fissuration thermique.
- L’utilisation d’additions minérales dans la composition du béton peut réduire cette fissuration en diminuant la quantité de chaleur générée pendant l’hydratation.
- L’utilisation d’ajouts minéraux à la place du ciment, qui est un matériau nécessitant une grande quantité d’énergie pour sa production, permet de diminuer les coûts de fabrication du béton.
- En incorporant ces sous-produits dans la composition du béton, non seulement on leur donne une utilité, mais cela contribue également à réduire l’impact environnemental de l’industrie cimentaire en diminuant les émissions de CO_2 .

Pour éviter les problèmes de ressuage et de ségrégation, les mélanges de BAP sont composés d’une quantité importante de matériaux fins, par exemple les fillers calcaire ce sont des matériaux fins utilisés pour limiter le dégagement de chaleur, réduire le ressuage et augmenter la résistance à la compression notamment à jeune âge [Bensebti, 2008].

Ci-dessous, nous exposons les ajouts minéraux qui peuvent être inclus dans la composition des BAP :

- Les fillers calcaires
- Les pouzzolanes naturelles
- Le laitier de haut fourneau

- La fumée de silice
- Les cendres volantes..

2.3.4 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est essentielle pour activer la réaction d'hydratation du ciment, il permet aussi de lier les constituants du béton entre eux. L'eau du réseau public est généralement utilisée pour la formulation du BAP, mais il est important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et du sable afin de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Les eaux recyclées de gâchage et de lavage peuvent être utilisées sous certaines conditions restrictives en raison d'éventuels effets indésirables sur les propriétés du béton.

2.3.5 Adjuvants chimiques

Les adjuvants chimiques sont des produits ajoutés au béton pour modifier ses propriétés à l'état frais ou durci. Ces produits sont souvent des tensioactifs et peuvent avoir des fonctions secondaires. Les adjuvants fluidifiants de dernière génération, à base de polycarboxylates, permettent de réduire le dosage en eau tout en améliorant la viscosité, mais un dosage élevé peut retarder la prise et provoquer des problèmes de ségrégation. Il est donc important de sélectionner les adjuvants les mieux appropriés pour chaque ciment au moyen d'essais préliminaires afin d'éviter une perte de performances du béton. Le tableau 2.1 présente les différents adjuvants pouvant être utilisés dans le béton.

TABLE 2.1 – Différents types d'adjuvants pour béton [Baron et Ollivier, 1999]

Adjuvant	Effet(s)	Performances par rapport à un béton témoin
Plastifiant réducteur d'eau	Réduction de dosage en eau	$\geq 5\%$
Superplastifiant haut réducteur d'eau	Augmentation de la résistance à la compression à 7 et 28 jours	$\geq 110\%$
	Réduction de dosage en eau	$\geq 12\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 1 jour	$\geq 140\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 28 jours	$\geq 115\%$
	Augmentation de l'affaissement au cône d'Abrams	$\geq 120\%$
Rétenteur d'eau	Diminution de la quantité d'eau ressuée	$\leq 50\%$
Entraîneur d'air	Augmentation de la quantité d'air entraîné	$\geq 2.5\%$
Accélérateur de prise	Augmenter le temps de début de prise à 20°C	≥ 30 min
	Diminution du temps de début de prise à 5°C	≤ 60 min
Accélérateur de durcissement	Augmentation de la résistance à la compression à 24h à 20°C	$\geq 120\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 48h à 5°C	$\geq 130\%$
Retardateur de prise	Augmenter le temps de début de prise	≥ 90 min
	Diminuer le temps de fin de prise	≤ 360 min
Hydrophobant	Absorption capillaire pendant 7 jours après 7 jours de conservation	$\leq 50\%$

Les superplastifiants polycarboxylate ont favorisé le développement des bétons autoplaçants en France. Ce sont des réducteurs d'eau très efficaces, généralement présentés sous forme liquide et composés de longues molécules organiques à masse élevée, tels que les sels de sodium ou de calcium du polynaphtalène sulfoné et les sels de sodium de la polyméline sulfonée. Les superplastifiants,

en s'adsorbent à la surface des grains de ciment, neutralisent les charges électrostatiques et permettent ainsi la dispersion des grains de ciment, (Figure 2,4). Cette dispersion libère de l'eau qui est alors disponible pour la lubrification du mélange, ce qui augmente la maniabilité du béton, [Boukni 2007].

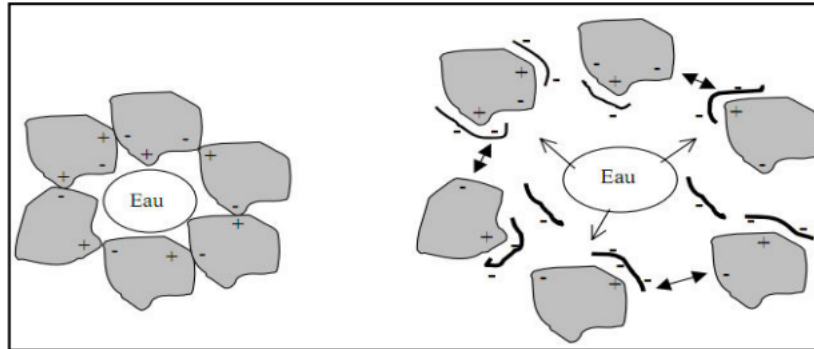


FIGURE 2.4 – Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [Sedrane 1999].

2.4 Approches de formulation

La formulation du béton autoplaçant est une opération complexe, qui nécessite la recherche d'une combinaison appropriée de matériaux compatibles et le dosage précis de chaque constituant afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés requises pour un BAP. Plusieurs approches ont été développées à travers le monde pour répondre aux exigences de mise en œuvre de ce type de béton, tel que l'approche japonaise, l'approche chinoise, et l'approche française LCPC . Ces approches demeurent empiriques et se concentrent sur l'optimisation soit de la fraction fine de la pâte de ciment ou du mortier, soit du squelette granulaire. Selon les recommandations du comité de l'American concrete Institute sur l'emploi des BAP [ACI 237 R, 2007], on peut distinguer trois scénarios de formulation des BAP :

- Forte teneur en poudre et utilisation de superplastifiant.
- Faible teneur en poudre, utilisation de superplastifiant et d'agent de viscosité.
- Moyenne teneur en poudre, utilisation de superplastifiant et une quantité limitée d'agents de viscosité.

La figure suivante (Figure 2.5) , présente les critères de base de formulation du BAP.

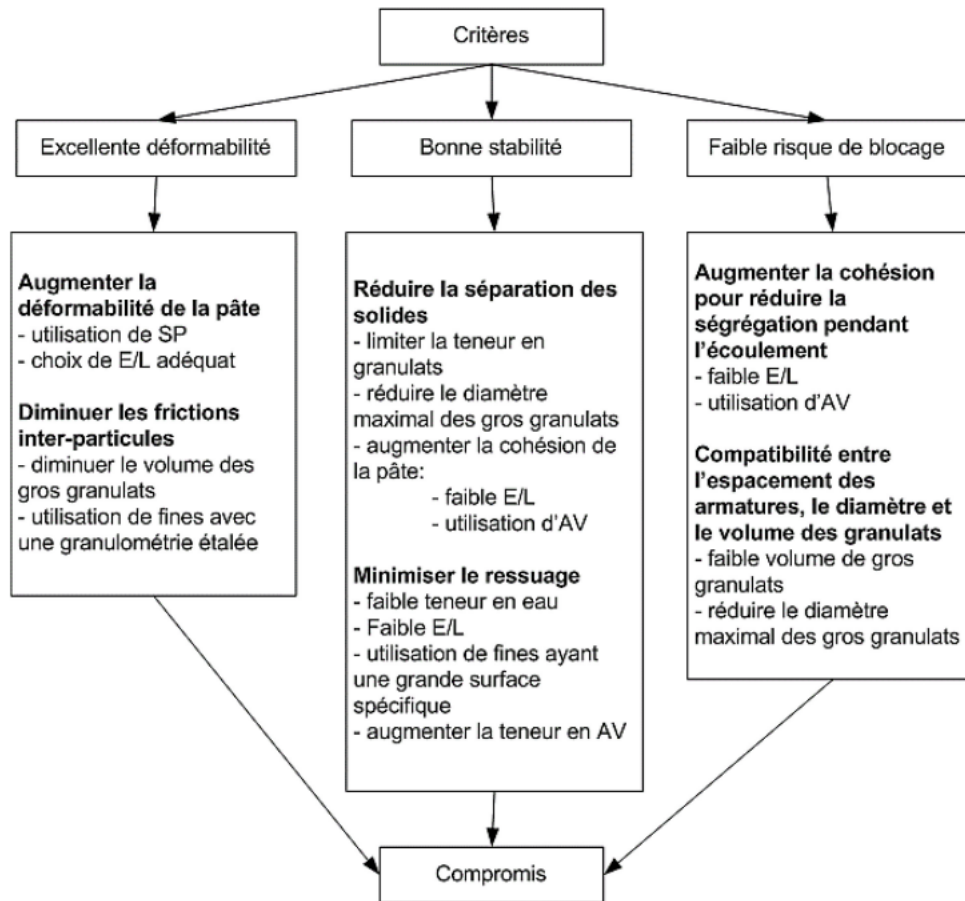


FIGURE 2.5 – Critères de base pour assurer une bonne déformabilité, une stabilité acceptable et un faible risque de blocage [Khayat, 1999].

2.4.1 Approche japonaise [Okamura et Ouchi, 2003]

C'est une méthode proposée par [Okamura et al, 1995]. elle est basée sur la formulation du mortier de béton en premier lieu, le mortier contenant une quantité de sable arbitraire, ensuite on cherchera expérimentalement le dosage d'eau et de superplastifiant, le liant étant formé de ciment et d'addition minérale. La méthode se résume comme suit :

- La quantité de gravillon est limitée à 50% du volume total des solides
- le volume de sable est limité à 40% du volume total de mortier
- La caractérisation de la fluidité et de la viscosité se fait à travers l'essai d'étalement et le temps d'écoulement au V-funnel respectivement

2.4.2 Approche Française

C'est une méthode proposée par [De Larrard et al, 1994], elle est basée sur l'optimisation du squelette granulaire par l'emploi d'un modèle mathématique intitulé « Modèle de suspension solide ». le principe de ce modèle est l'optimisation de la granularité des matériaux de génie civil à partir de grandeurs expérimentales faciles à mesurer. On peut résumer la démarche de formulation de la manière suivante :

- La première proportion du liant est fixée
 - LE dosage en superplastifiant est égal à la moitié
 - La demande en eau est évaluée en prenant en compte le dosage de superplastifiant de celui de la saturation pour une viscosité élevée
 - Les calculs sont exécutés avec le logiciel (BétonPro2) en tenant compte du confinement
- Parmi les avantages de cette méthode on peut citer :
- Cette méthode offre de bonnes perspectives pour la formulation économique du BAP
 - La méthode permet de réduire le nombre d'essais préalable requis, ce qui implique un gain de temps considérables

2.4.3 Approche Suédoise

C'est une méthode proposée par Petersson et coll en 1996, c'est une approche similaire à l'approche française, Il s'agit d'une méthode qui permet de déterminer expérimentalement la quantité minimale de liant nécessaire, pour obtenir un taux de remplissage optimal dans la boîte en L. Pour ce faire, on calcule cette quantité minimale pour chaque rapport granulats/sable (G/S), en se basant sur les courbes de référence spécifiques à chaque type de granulats utilisés. L'objectif est d'obtenir une bonne compacité du mélange, tout en évitant l'excès de liant qui pourrait conduire à une faible résistance ou à une mauvaise qualité de béton.

Pour cette méthode les quantités de fines, d'eau et de superplastifiant sont déterminées en se basant sur une viscosité suffisante pour un seuil de cisaillement faible et une résistance à la compression ciblée.

Bien que cette méthode soit plus efficace que la méthode japonaise pour optimiser la composition de la pâte, elle reste difficile à appliquer pour la formulation des bétons autoplaçants (BAP). La principale difficulté réside dans le fait que les courbes de référence pour chaque granulats ne sont pas standardisées, ce qui signifie qu'il faut beaucoup de temps et d'essais préliminaires pour les établir. Cela rend le processus de formulation des BAP plus long et plus coûteux, ce qui peut rendre cette méthode moins pratique pour les entreprises qui cherchent à produire des BAP en grande quantité, [Chekireb 2015].

2.4.4 Approche Nord-Américaine

Cette méthode est composée de deux méthodes de formulation, la première appelée "BAP type poudre" et la deuxième appelée "BAP type AV". Le but de cette combinaison est d'assurer un faible seuil de cisaillement et une viscosité modérée. "BAP type poudre" est une méthode de formulation qui combine des éléments de l'approche japonaise et de la méthode de formulation du béton hautes performances (BHP). Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un faible rapport (E/L) ainsi que l'ajout d'éléments minéraux tels que la fumée de silice, les cendres volantes, les laitiers et les fillers calcaires pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

Le maintien de la fluidité est basé sur l'ajout des superplastifiants, le volume élevé d'éléments en poudre remplace une partie du ciment pour maintenir une viscosité modérée.

Pour la méthode "BAP type AV" la plasticité est assurée par l'utilisation d'agent de viscosité [Chekireb,2015].

2.4.5 Méthode de mortier de béton équivalent (MBE)

C'est la méthode de formulation utilisée dans notre étude, elle consiste à remplacer la totalité des gros granulats par une certaine masse de sable équivalente en surface spécifique. Cette approche permet de réduire considérablement le temps et le coût lors de la procédure d'optimisation des bétons autoplaçant .

Cette méthode a été adaptée avec des résultats mitigés pour évaluer et prédire les propriétés à l'état frais des BAP à partir de celles de leurs MBE. La limitation de l'approche est essentiellement due au fait que la surface spécifique est le seul critère considéré dans le changement de phase (BAP vers MBE). Donc la méthode de mortier de béton équivalent permet de sélectionner rapidement parmi différents adjuvants celui qui répond le mieux aux exigences d'efficacité, elle permet aussi de fixer le dosage en eau, et le dosage en adjuvat à travers l'essai de l'étalement et l'essai de V Funnel sur le mortier [Ammar Yahia et al, 2018].

2.5 Conclusion

Contrairement aux bétons ordinaires qui nécessitent quatre ingrédients de base, La formulation du béton autoplaçant (BAP) est un processus complexe qui nécessite une attention particulière aux propriétés requises du BAP.

La proportion des différents ingrédients dans la formulation du béton autoplaçant doit être calculée avec précision en tenant compte des spécifications de performance requises.

Il est également très important de noter que la formulation du BAP doit être personnalisée pour chaque projet en particulier, en fonction des conditions environnementales telles que le climat, les méthodes de coulage, ainsi que les exigences de conception spécifiques.

Chapitre 3

Caractéristiques des BAP

3.1 Introduction

Le béton autoplaçant a gagné en popularité ces dernières années, en raison de ses propriétés. Dans ce chapitre, nous allons examiner de plus près les caractéristiques du BAP à l'état frais et à l'état durci, en mettant en évidence les avantages qu'il offre par rapport aux bétons ordinaires.

3.2 Caractérisations des BAP À L'état frais

La capacité du béton à rester homogène dépend fortement de la nature du mortier qui le compose. Le mortier sert à séparer les granulats les uns des autres et à diminuer les forces de cisaillements dues à leurs déplacements. Pour évaluer ces caractéristiques, des équipes de recherches ont développé plusieurs types d'essais [Turcry,2004].

Les BAP doivent satisfaire aux tests normalisés décrits par la norme EN 206-9 pour évaluer leurs propriétés à l'état frais. Ces tests comprennent :

TABLE 3.1 – Essai sur le BAP a l'état frais

Essais	Norme
Essai de d'étalement	[ND EN 12350-8]
Essai de V Funnel	[NF EN 12350-9]
Essai de la boîte en L	[NF EN 12350-10]
Essai de stabilité au tamis	[NF EN 12350-11]

3.2.1 Essai de l'étalement

Cet essai a un but d'estimer L'ouvrabilité du BAP, c'est l'un des essais empiriques les plus utilisés, car il est facile à mettre en œuvre. L'essai d'étalement s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams. Le béton est introduit dans le cône sans compaction, le résultat s'exprime en Termes de moyenne de deux diamètres de la galette en arrondissant au centimètre supérieur. Pour un béton autoplaçant La valeur d'étalement peut varier entre 55 et 85 cm. Une observation visuelle de cet essai permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou pas,[Abib, 2004] .

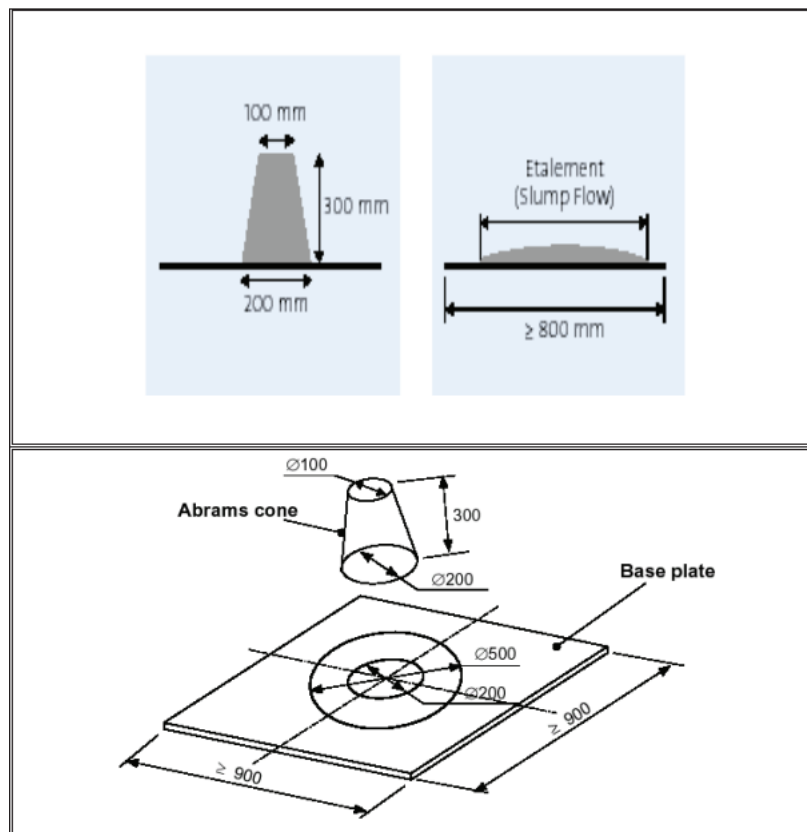


FIGURE 3.1 – Essai d'étalement

SELON la norme NF EN 206/cn les différents classes d'étalement sont été définies :

- 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

3.2.2 Essai de V funnel

Cet essai est développé par Ozawa et AL [Sedran, 1999], constitue un indicateur sur la viscosité du béton en mesurant le temps d'écoulement de béton à travers un entonnoir. La procédure de l'essai de V funnel est la suivante :

- Le béton a été coulé dans l'entonnoir jusqu'à ce qu'il atteigne le niveau de la surface supérieure de l'entonnoir est rempli de béton jusqu'au le niveau supérieure de la surface
- On ouvre le clapet de fermeture qui se trouve à la base de l'entonnoir et on mesure le temps nécessaire pour que l'entonnoir se vide complètement.

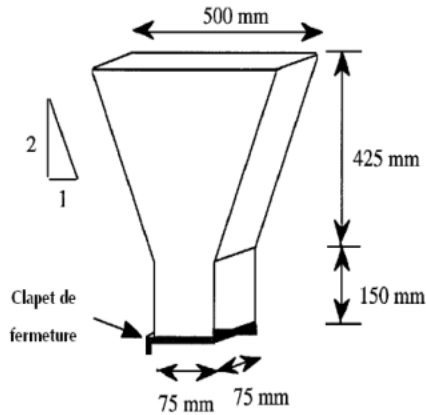


FIGURE 3.2 – Schéma du V Funnel

3.2.3 Essai de la boîte en L

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton frais en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptable, [Sedran, 1999] .

Le principe consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte en forme de L en une seule fois, puis en ouvre une trappe, après l'écoulement de béton on mesure la différence de hauteur H_2/H_1 , (Figure 3.3).

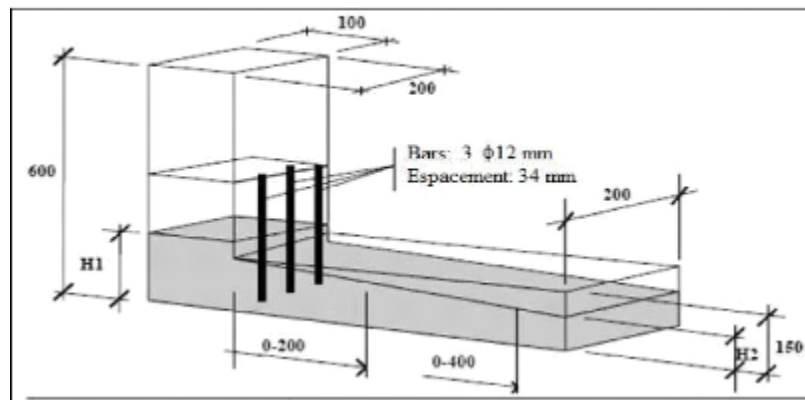


FIGURE 3.3 – Essai de la boîte en L

La condition requise pour que le BAP soit acceptable est que le rapport de hauteur H_2/H_1 de la boîte en L soit supérieur à 0,8.

3.2.4 Essai de stabilité au tamis

Cet essai est appelé test de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants. Son objectif est d'évaluer la résistance des BAP vis-à-vis du risque ségrégation.

Le principe de cet essai c'est d'évaluer le pourcentage de laitance en masse d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis ayant des mailles de 5 mm d'ouverture, (Figure 3.4)

À la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans le seau. , Après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis de 5 mm une masse de 4,8 kg de béton ($\pm 0,2$ kg). Le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé par rapport à la masse de l'échantillon initial, ce pourcentage donne l'indice de ségrégation, cet indice conduit à classer les formules de BAP de la façon suivante :

- $0 < < 15\%$ stabilité satisfaisante.
- $15 \% < < 30\%$ stabilité critique, l'essai à refaire in situ.
- $> 30\%$ stabilité très mauvaise, béton inutilisable.

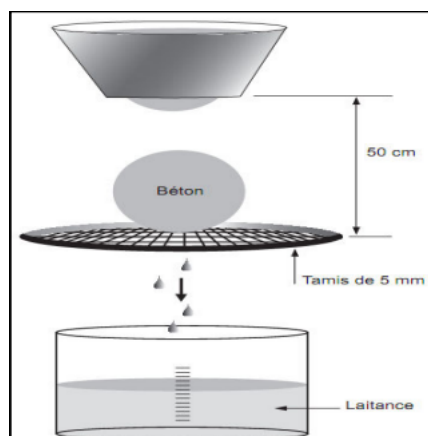


FIGURE 3.4 – Essai de stabilité au tamis

TABLE 3.2 – Les valeurs recommandées pour les essais à l'état frais [AFGC]

Étalement	de 60cm à 75cm
$\frac{H_2}{H_1}$	≥ 0.8
Laitance	$\leq 15\%$

3.3 Caractérisations des BAP à l'état durci

Si le BAP est correctement conçu et mis en place, les caractéristiques de son état durci, ne sont pas très différentes de celles d'un béton ordinaire vibré.

Selon plusieurs chercheurs, ces propriétés sont souvent supérieures, surtout lorsque le béton doit répondre à des exigences courantes, ce qui est généralement le cas dans le domaine du bâtiment.

3.3.1 La résistance à la compression

D'après les recherches menées par [Gibbs, 1999], les bétons autoplaçants ont une résistance A 7 jours supérieure à celle des bétons vibrés (BV). Cette amélioration de la résistance serait due à la présence de poudre de calcaire dans les BAP, qui accélère l'hydratation et la résistance à la compression au jeune âge.

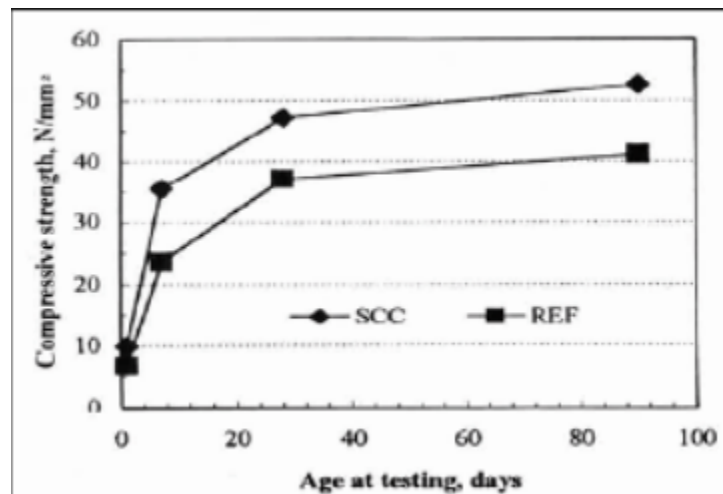


FIGURE 3.5 – Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [Gibbs, 1999].

La résistance mécanique en compression des BAP peut varier en fonction de la composition du liant utilisé. Différents types de liants peuvent être utilisés, tels que des ciments Portland, des ajouts minéraux, des fumées de silice, des cendres volantes, etc. Chaque type de liant peut avoir un effet différent sur la résistance mécanique en compression des BAP. Par exemple, l'utilisation d'ajouts minéraux à caractère pouzzolanique peut augmenter la résistance à long terme des BAP, tandis que l'ajout de fumées de silice peut améliorer leur résistance initiale. Les recherches ont montré que l'optimisation de la composition du liant peut conduire à des améliorations significatives de la résistance mécanique en compression des BAP [CERIB 2021].

3.3.2 La résistance à la traction

La résistance des BAP à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer cette résistance.

[Sonebi, 1999] a constaté que la résistance à la traction à 28j pour les BAP conservés dans l'eau est supérieure à celle du béton de référence conservé dans les mêmes conditions.

Nous avons aussi les recherches menées par [Gibbs et Coll. 1999], ils ont conclu qu'il y a une légère différence entre la résistance à la traction et en compression des BAP et du béton vibré. .

3.3.3 Module d'élasticité

Si les BAP contiennent une basse quantité de gros granulats, cela peut montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation. Il a été constaté par [Person,2001] que les modules d'élasticité des BAP et des bétons vibrés (BV) sont similaires.

[Pons et al,2003],ont également obtenu des résultats similaires, confirmant que les modules d'élasticité des BAP et des bétons vibrés (BV) étaient comparables.

Cependant, une étude menée par [Pineaud, 2007], a révélé que le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui des bétons vibrés (BV).

3.3.4 Déformations et fluage

On peut définir le fluage comme une déformation progressive et continue d'un matériau soumis à une charge constante au fil du temps, [Neuville 2000].

Le phénomène de fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure et aussi de type de matrice de ciment, Les travaux de Proust ont mis en évidence des valeurs de résistance similaires pour les BAP et les bétons vibrés (BV) de même ordre de grandeur[Proust,2002].

Ces résultats ont été corroborés par [Turcry,2004], qui a constaté que la déformation en fluage totale du BAP était identique à celle du BV lorsqu'ils étaient soumis à une compression.

3.3.5 Le retrait

Les travaux de [Turcry , 2004] ont montré que l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons vibrés,(Figure 3.6)

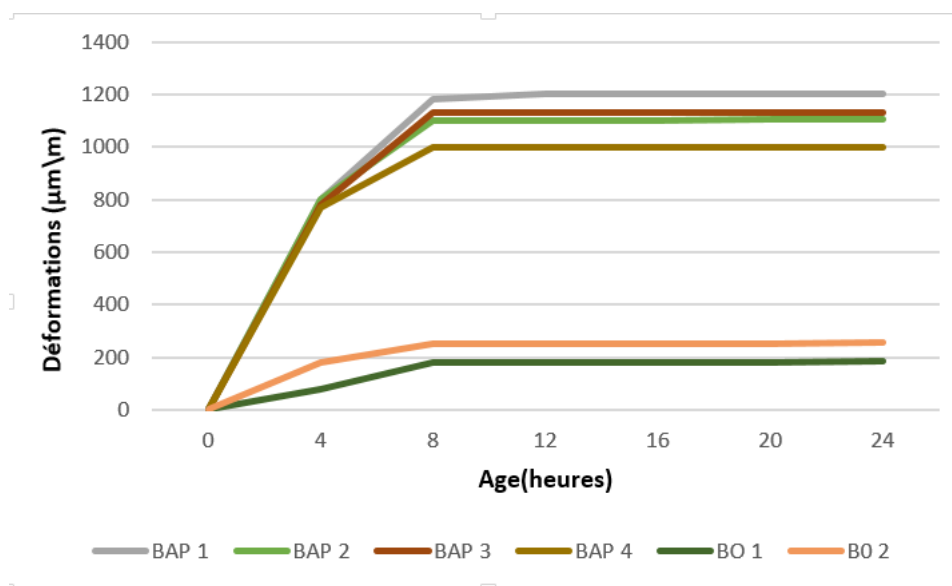


FIGURE 3.6 – Retrait plastique des formules de BAP et de BV, [Turcry 2004] .

L'étude de [Gram et al,1999] , a montré que le retrait plastique pour les BAP est deux à trois supérieure a celle des BV, (Figure 3.7)

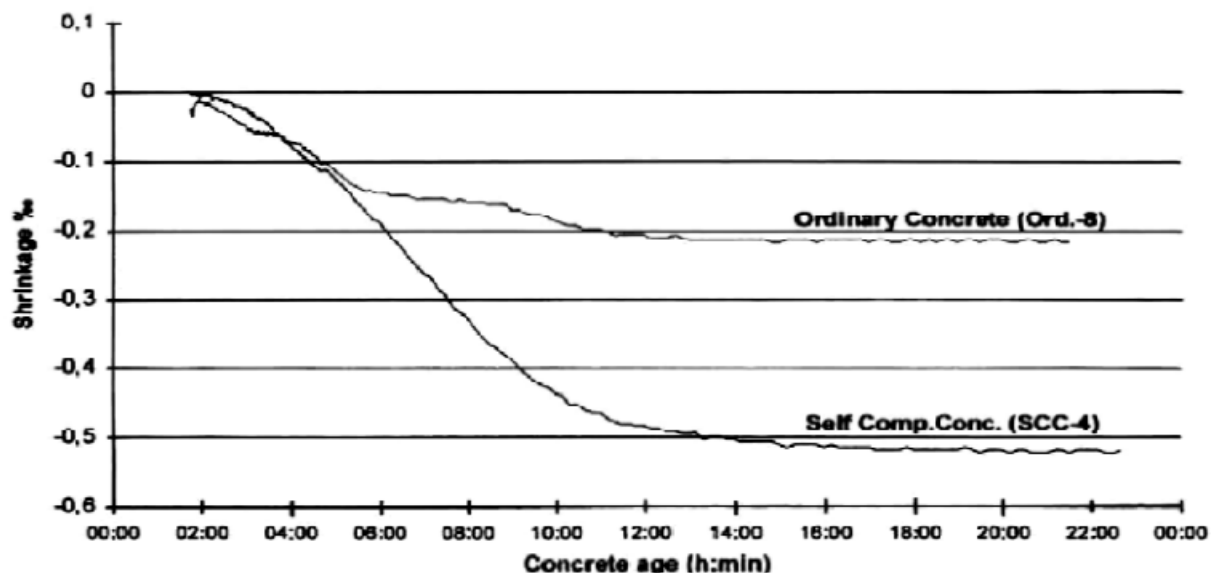


FIGURE 3.7 – Retrait plastique de BAP et de BV de structure ($T = 20^{\circ}\text{C}$, 50% HR) [Gram et al,1999] .

Pour le retrait endogène, selon [Person, 1998]. les BAP présentent des déformations libres, telles que les retraites endogènes et de dessiccation, ces déformations sont équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance.

3.3.6 Résistance de gel-dégel

Le gel et le dégel du béton c'est un processus naturel qui se produit lorsque de l'eau présente dans le béton. Une bonne résistance au gel peut être obtenue avec un bon choix et une bonne optimisation des matériaux. Les BAP, sont plus résistants au gel-dégel que les bétons vibrés (de même rapport E/C, avec ou sans entraîneur d'air) [Hasni ,1999].

Selon l'étude menée par [Assié,2004], un test d'écaillage a été réalisé sur BAP et BV. Les résultats ont montré que le béton vibré présente une perte de masse supérieure à celle des BAP,(figure 3.8).

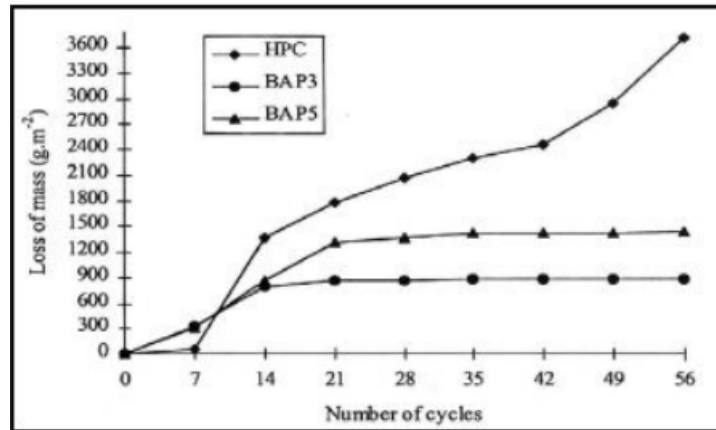


FIGURE 3.8 – Perte de masse de deux BAP et d'un béton vibré pendant un test d'écaillage [Assié 2004]) [Gram et al,1999] .

3.3.7 Perméabilité a l'eau

Selon l'étude menée par Hou et son équipe la pénétration de substances nocives dans le béton dépend de sa fluidité, qui est gouvernée par la loi de Darcy, [Hou et al ,2004]

La même étude précédente, a examiné la perméabilité du béton après une période de cure de 90 jours. Les résultats ont montré que plus le rapport eau/ciment était bas, plus la perméabilité du béton était faible. Cela signifie qu'un rapport eau/ciment réduit conduit à une diminution de la perméabilité du béton, ce qui indique une meilleure résistance à la pénétration de l'eau, [Hou et al ,2004].

3.4 Conclusion

Comme tout type de béton , il est très important de vérifier la qualité du BAP pour s'assurer que le béton atteint les normes requises pour sa conception, donc il est obligatoire de faire des tests de vérifications à l'état frais et à l'état durci.

Les essais à l'état frais ont un but de vérifier la consistance, qui doit être adaptée de manière à permettre une mise en place homogène et sans nécessiter une vibration, aussi à l'état frais on doit vérifier la faciliter d'écoulement à travers le coffrage (la fluidité) . Le respect de ces critères est indispensable pour garantir la qualité et la performance du béton autoplaçant tout au long de sa durée de vie.

A l'état durci, on doit garantir que le béton peut résister aux charges et aux contraintes auxquelles il sera soumis, le BAP doit aussi être durable c'est-à-dire capable à résister aux conditions environnementales, à l'usure quotidienne et à l'altération chimique.

Chapitre 4

La poudre de verre et le béton autoplaçant

4.1 Introduction

Après avoir parcouru dans les chapitres précédent les performances de la poudre de verre, son effet sur les bétons vibré de manière générale ainsi que les caractéristiques des bétons autoplacants et leurs de méthodes de formulation, il nous parait opportun d'exposer l'état de l'art de l'influence de la poudre de verre sur les BAP en particulier. Ceci constituera le socle de base qui va servir lors de l'analyse et l'interprétation de nos résultats.

En effet ,plusieurs recherches ont étudié l'utilisation de la poudre de verre dans les bétons autoplacants, [Vanjare et al, 2012] , [Roy et al ,2017] , [Hendi et al,2019] , [Chekireb,2015] et [Boucetta et al,2013] .

Ces études ont montré que la valorisation de la poudre de verre dans les BAP est une technique prometteuse qui présente des avantages économiques, environnementaux et de performance pour le béton.

Dans ce chapitre, nous allons discuter des résultats obtenus sur le BAP par les différents chercheurs, à l'état frais, et à l'état durci.

4.2 Influence de la poudre de verre sur les caractéristiques du BAP A l'état frais

4.2.1 Influence de la poudre de verre sur l'Étalement

Selon l'étude qui a été faite par [Boucetta et al.2013] . L'ajout de la poudre de verre augmente l'étalement de béton autoplacant , cette augmentation est due à l'augmentation de la pâte par l'introduction des additions qui ont entraîné une réduction des frottements des granulats, ce qui donne une dispersion des granulats [KENNEDY,1940].

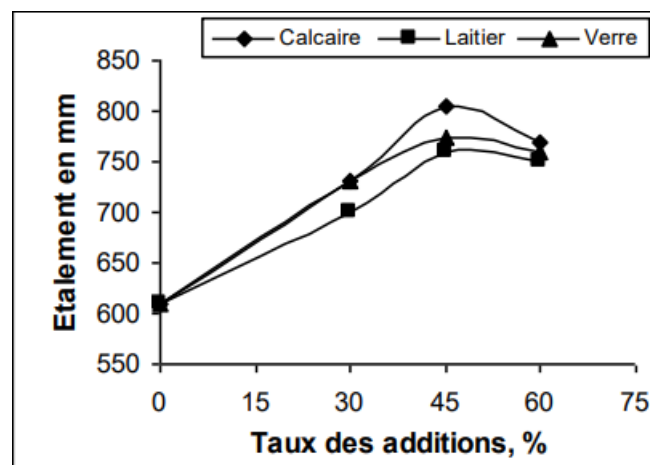


FIGURE 4.1 – Influence du dosage en addition sur l'étalement [Boucetta et al ,2013].

Les mêmes résultats on était affirmé par [Chekireb, 2015], qui a trouvé une amélioration de l'étalement du BAP lors de l'ajout de la poudre de verre.

Cependant l'étude menée par [Roy et al ,2017], a montré des résultats contradictoires, une diminution de l'étalement du BAP lors de l'ajout la poudre de verre, le tableaux suivant présente les résultats trouvé.

TABLE 4.1 – Résultat de l'étalement [Roy et al ,2017]

Pourcentage de la PV	Etalement (mm)
0%	105
5%	103
10%	97
15%	95

4.2.2 Influence de la poudre de verre sur le taux de remplissage

L'étude menée par [Boucette et Behim ,2013], montre que tous les mélanges de remplissage sont compatibles avec les bétons autoplaçants, sauf le béton autoplaçant de référence qui ne contient aucune addition. Cela confirme l'importance d'augmenter le volume de pâte dans la composition des bétons autoplaçants en ajoutant des fines. Un taux optimal d'addition d'environ 30% pour la poudre de verre permet d'obtenir le meilleur taux de remplissage,(Figure 4.3)

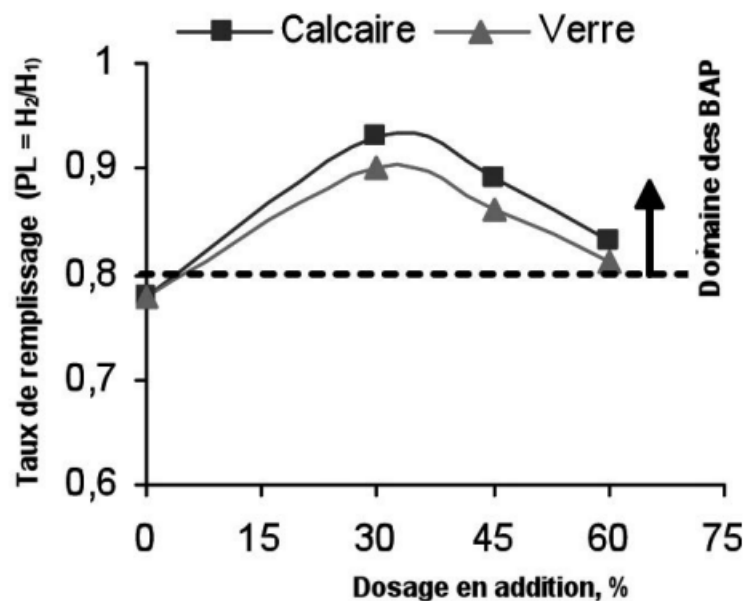


FIGURE 4.2 – Résultats de l'essai de la boîte en L [Boucette et Behim,2013]

Cependant l'étude élaborée par [Vanjare et al ,2019], montre le contraire. Une diminution du taux de remplissage due à l'augmentation de la quantité de poudre de verre ajoutée dans le BAP, (Figure 4 .2)

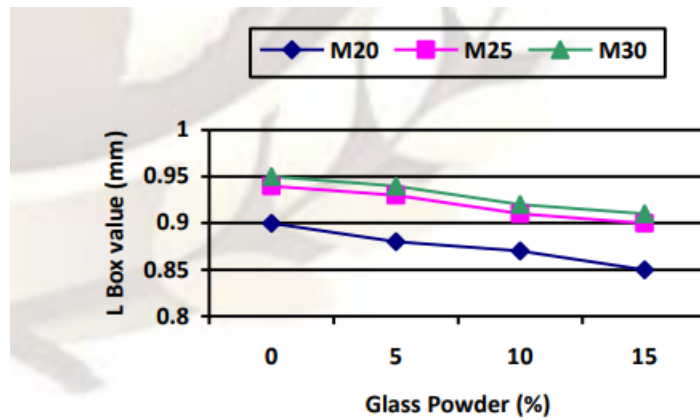


FIGURE 4.3 – Résultats de l'essai de la boîte en L [Boucetta et Behim,2013]

4.2.3 Influence de la poudre de verre sur le T50

Les recherches de [Boucetta et Behim ,2013], montre une augmentation significative du T50 Lorsque on augmente le dosage de la poudre de verre, (Figure 4,4).

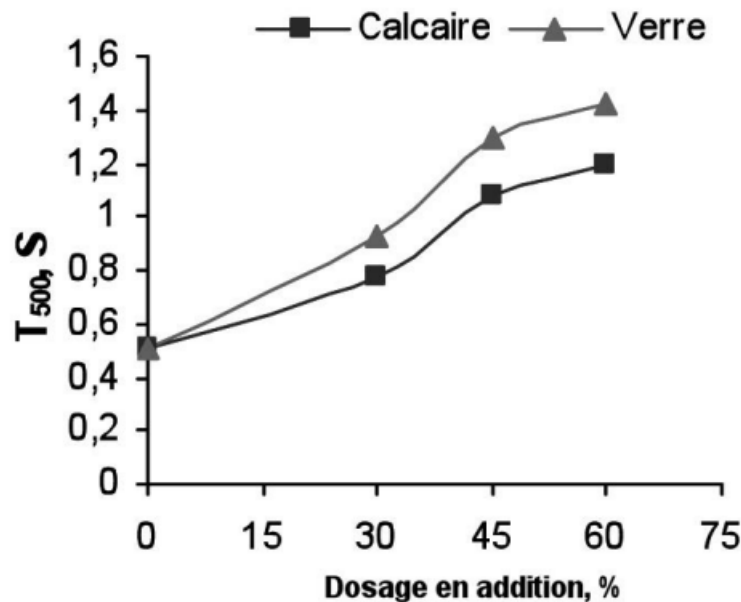


FIGURE 4.4 – Mesure de T50 En fonction de la quantité de la PV ajoutée, [Boucetta et Behim ,2013]

Cependant, [Roy et al,2017] ont trouvé des résultats différents , ils ont constaté une diminution du T50 lors de l'ajout de la poudre de verre , la figure suivante (Figure 4.5) illustre les résultats de leurs recherche.

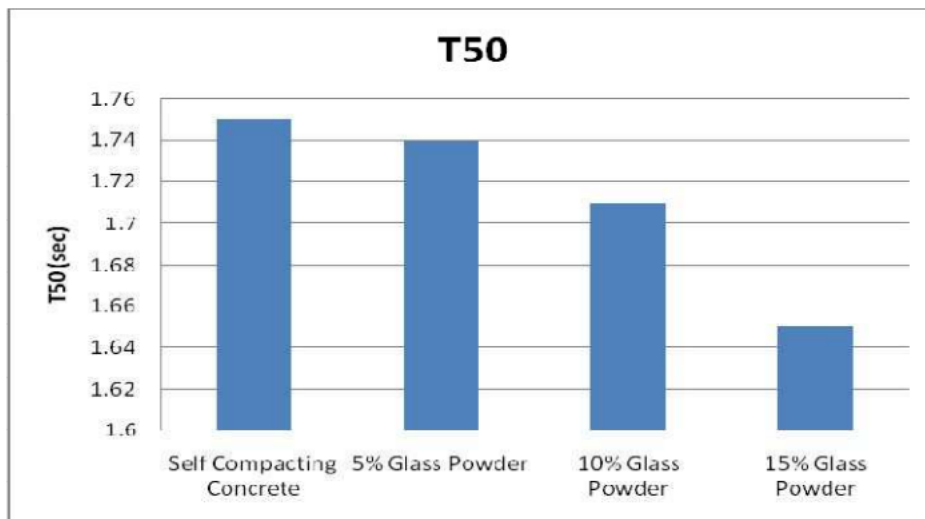


FIGURE 4.5 – Influence de la poudre de verre sur T50 [Roy et al ,2017]

4.2.4 Influence de la poudre de verre sur la Résistance à la ségrégation

La poudre de verre améliore la stabilité du béton autoplaçant. Cependant, lorsque le volume de pâte dépasse un certain seuil, cela peut entraîner une résistance à la ségrégation excessive, ce qui signifie que le béton devient trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis, [Boucette et Behim, 2017] .

La figure suivante (Figure 4,6) illustre les résultats de l'étude menée par [Boucette et Behim, 2017].

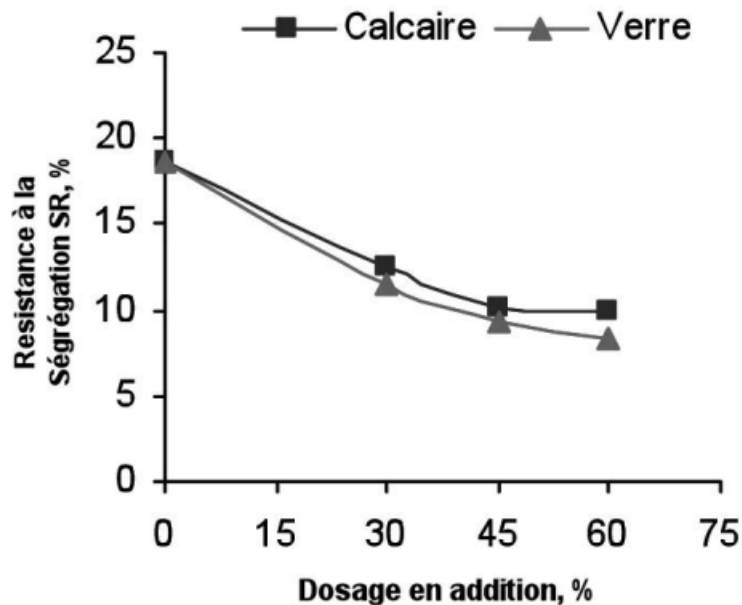


FIGURE 4.6 – Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis [Boucette et Behim, 2017]

4.3 Influence de la poudre de verre sur les caractéristiques du BAP A l'état durci

4.3.1 Influence de la poudre de verre sur la résistance a la compression

La remplacement du ciment par la poudre de verre dans la formulation du béton autoplaçant entraine une diminution de la résistance à la compression a jeune âge , (Figure 4.7),[Vangare et al,2012].

Les résultats trouvés par l'étude de [Chekireb ,2015] confirment les mêmes conclusions.

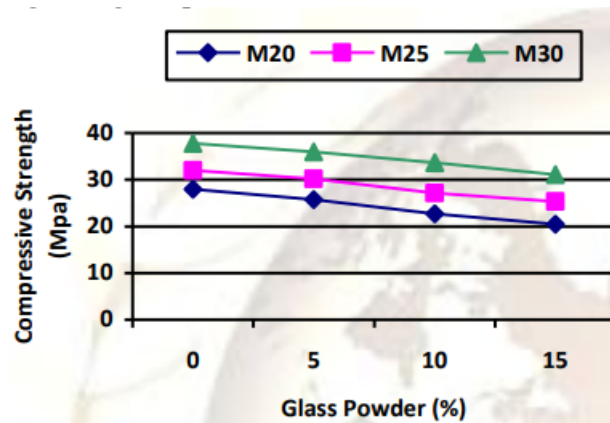


FIGURE 4.7 – , Influence des pourcentages de poudre de verre sur la résistance à la compression des BAP [Vanjare et al , 2012]

Cependant l'étude élaboré par [Roy et Kumar ,2017], a trouvé d'autres résultats, selon eux, la poudre de verre augmente la résistance à la compression à jeune et à longue âge.

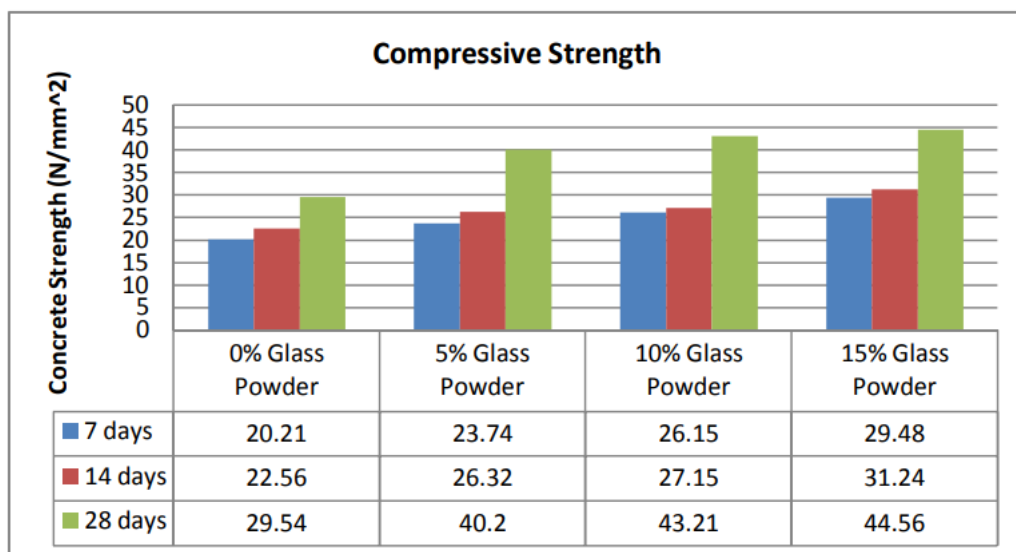


FIGURE 4.8 – , Influence des pourcentages de poudre de verre sur la résistance à la compression des BAP [Roy et Kumar ,2017]

4.3.2 Influence de la poudre de verre sur la résistance à la flexion

L'étude menée par [Roy et Kumar, 2017], a conclu que le béton autoplaçant contenant un pourcentage de 15 de la poudre offrait la meilleure résistance à la flexion, (Figure 4.9).

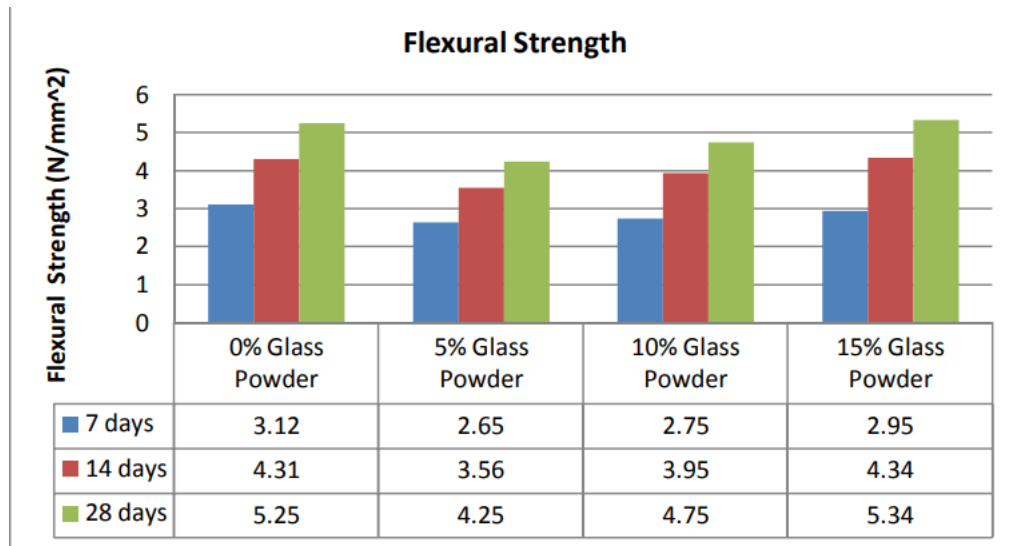


FIGURE 4.9 – Influence des pourcentages de poudre de verre sur la résistance à la flexion des BAP [Roy et Kumar ,2017]

[Vanajre et al,2017] , ont prouvé que l'augmentation de la poudre de verre dans le BAP réduit la résistance à la flexion. La réduction moyenne des résistances en flexion pour toutes les classes était d'environ 2%, 3,7% et 6,75% pour des contenus de poudre de verre de 5%, 10% et 15% respectivement, (Figure 4.10).

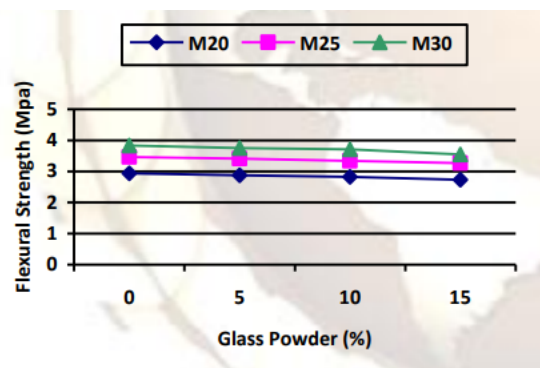


FIGURE 4.10 – Influence des pourcentages de poudre de verre sur la résistance à la flexion des BAP [Vanjare et al , 2012]

4.3.3 Influence de la poudre de verre sur le module d'élasticité

Selon l'étude menée par [Chekireb ,2015], lorsque la teneur en PV augmente dans les BAP, cela entraîne une diminution du module d'élasticité à 28 jours, (Figure 4.11). Toutefois, on constate une nette amélioration des propriétés mécaniques à 91 jours, qui est proportionnelle à la quantité de

PV ajoutée. En effet, entre 28 et 91 jours, les bétons avec 20% PV, 30% PV, et 40% PV, présentent respectivement une évolution de leurs valeurs de module de 27%, 23% et 48%

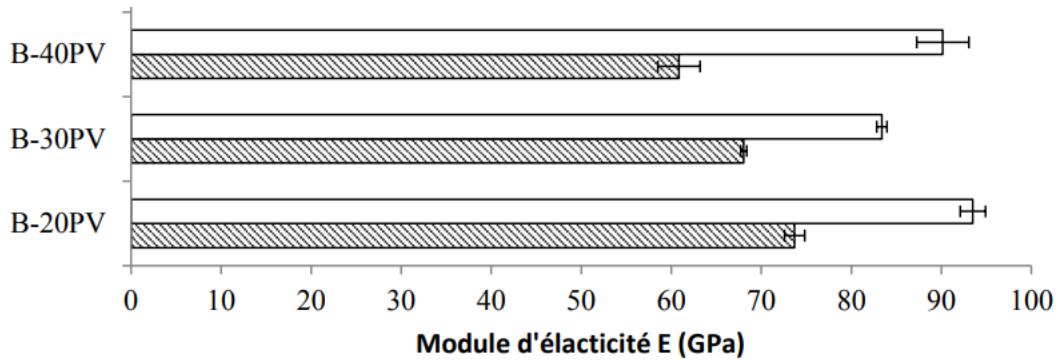


FIGURE 4.11 – Influence des pourcentages de poudre de verre sur le module d'élasticité des BAP [Chekireb, 2015]

4.4 Conclusion

Il est important de noter que l'influence de la poudre de verre sur les propriétés du BAP peut varier d'une étude à une autre, en fonction des paramètres de mise en œuvre. Par exemple le temps de malaxage, la température ambiante et l'humidité relative peuvent tous avoir un effet sur les propriétés du BAP. Il est donc important de réaliser des tests approfondis pour déterminer les proportions de mélange optimales et les conditions de mise en œuvre afin d'obtenir les propriétés désirées du BAP et de déclarer de manière précise l'influence de l'ajout de poudre de verre sur les performances de béton de manière générale et de BAP de manière particulière.

Chapitre 5

Méthodes expérimentales exploitées

5.1 Introduction

Afin de caractériser nos matériaux avant de formuler et d'évaluer les performances du BAP, plusieurs essais ont été réalisés. Ce chapitre offre une description détaillée sur les essais effectués, sur les ciments, les granulats et sur le BAP à l'état frais et à l'état durci.

5.2 Essais sur les sables

Afin de caractériser les deux types de sable, plusieurs essais ont été effectués :

5.2.1 Essai de l'analyse granulométrique par tamisage [NA 2607]

Cet essai vise à déterminer la répartition de différentes tailles des particules dans le granulat, la répartition est représentée à travers la courbe granulométrique .

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Le procédé est le suivant :

- Le sable est préalablement lavé et séché dans une étuve pendant 24 heures.
- Le tamisage est effectué manuellement en utilisant une série de tamis disposés par ordre croissant de taille des ouvertures.
- Après le tamisage, les fractions de matériau retenues sur chaque tamis sont collectées avec précaution et pesées individuellement.
- Les masses obtenues pour chaque fraction sont utilisées pour calculer les pourcentages de masse cumulée
- Les données obtenues permettent de tracer la courbe granulométrique, qui représente la répartition des tailles de particules dans le sable



FIGURE 5.1 – Tamisage de sable

5.2.2 Essai de l'équivalent de sable [NA 455]

L'objectif principal de l'équivalent de sable est de mesurer la propreté du sable en évaluant la quantité de particules fines présentes dans l'échantillon. Le protocole de l'essai est le suivant :

-
- Prélavage et séchage du sable dans une étuve pendant 24 heures.
- Remplissage des éprouvettes graduées avec une hauteur d'eau spécifiée.
- Ajout d'une quantité de 120 g de sable dans les éprouvettes et laissé en repos pendant 20 minutes.
- Bouchage des éprouvettes et mise dans un agitateur, (fig. 5.3), pendant 30 secondes pour assurer une dispersion homogène des particules.
- Lavage du sable avec une solution lavant appropriée et laissé en repos pendant 20 minutes pour permettre la décantation des particules fines.
- Mesure de la hauteur du sable propre (H2) et de la hauteur du sable propre + éléments fins (H1). Calcul de l'équivalent de sable en divisant la hauteur du sable propre (H2) par la hauteur totale du sable propre plus les éléments fins (H1). Cette valeur doit être supérieure ou égale à 60



FIGURE 5.2 – Essai de l'ES



FIGURE 5.3 – Agitateur électrique

5.2.3 Essai de bleu de méthylène [NA 1948]

Cet essai vise à évaluer la quantité d'argile dans le sable en mesurant son absorption du bleu de méthylène. Pour réaliser cet essai, nous avons besoin d'un bécher, d'une baguette en verre, de papier filtre et d'un agitateur. La procédure de l'essai est la suivante :

- Peser 300 g de sable et 500 ml d'eau distillé
- Agiter le mélange à l'aide de l'agitateur pendant 5 minutes, avec une vitesse de 600 tours /minute
- Réduire la vitesse de l'agitateur à 400 tours / minute.
- Ajouter 5 ml de bleu de méthylène chaque minute et prélever une goutte de liquide à l'aide de la baguette en verre.
- Déposer la goutte de liquide sur le papier filtre jusqu'à l'obtention de film
- des tests de confirmation doivent être réalisés chaque minute pendant une durée de 5 minutes
- La valeur de bleu de méthylène est calculée en divisant de la quantité de bleu de méthylène ajoutée par le volume de sable



FIGURE 5.4 – Essai de Blue de méthylène

5.2.4 Essai de masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau [NF EN 1097-6]

Cet essai nous permet de déterminer deux caractéristiques essentielles des sables, la masse volumique réelle et leurs capacité d'absorption l'eau. L'essai se réalise comme suit :

- Prélever 1 kg d'échantillon.
- Introduire l'échantillon dans le pycnomètre et le rempli d'eau jusqu'à ce qu'il soit légèrement surabondant.
- Laisser le pycnomètre reposer pendant 24 heures.
- Éliminer les bulles d'air en agitant le pycnomètre.
- Peser le pycnomètre rempli d'eau et de granulat, et noter la masse (m_2).
- Vider le pycnomètre d'eau et sécher superficiellement les granulats contenus dans le pycnomètre.
- Mesurer la masse des granulats superficiellement secs dans l'air (m_1).
- Remplir le pycnomètre avec de l'eau et noter la masse (m_3).
- Remettre l'échantillon dans l'étuve et le laisser pendant 24 heures.
- La masse volumique réelle peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$\text{Masse volumique réelle} = \frac{\rho_w \cdot m_4}{m_1 - (m_2 - m_3)}$$

où ρ_w est la masse volumique de l'eau à la température enregistrée lors de la mesure de m_2 , m_4 est la masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air, M_1 est une certaine masse initiale, m_2 est la masse de la prise d'essai immergée dans l'eau, et m_3 est la masse de l'échantillon de sol utilisé pour remplir la prise d'essai. Le coefficient d'absorption d'eau peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$\text{Coefficient d'absorption d'eau} = \frac{(m1 - m4)}{m4} \cdot 100$$

où $m1$ est une certaine masse initiale et $m4$ est la masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air.

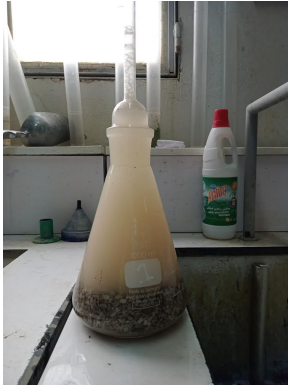


FIGURE 5.5 – Sable 0/4 dans le pycnomètre



FIGURE 5.6 – Sable 0/1 dans le pycnomètre

5.3 Essais sur les graviers

Les essais effectués sur les graviers sont présentés dans le tableau ci-dessous :

TABLE 5.1 – Essais sur les graviers

Essai	Norme
Analyse granulométrique	[NA 2607]
Masse volumique réelle et coefficient d'absorption	[NF EN 1097-6]

5.4 Essais sur ciments

5.4.1 Essai de la Surface Spécifique Blaine « SSB » [EN 196-6]

La surface spécifique Blaine du ciment est une mesure de sa finesse, qui indique la surface totale des grains présents dans une certaine quantité de poudre de ciment. Elle est généralement exprimée en m^2/kg ou en cm^2/g . Cette valeur reflète la surface de contact disponible entre le ciment et l'eau lors de l'hydratation.

L'essai de la SSB se fait à travers un perméabilimètre Blaine (Figure 5.7). Dans cet essai, un volume d'air est passé à travers la poudre de ciment contenue dans une cellule de l'appareil. La quantité de ciment utilisée dépend de sa densité absolue. En mesurant le temps que met le liquide de l'appareil pour se déplacer du trait supérieur au trait inférieur du tube, on peut estimer la SSB du ciment en utilisant l'équation suivante :

$$\frac{K}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{e^3}}{1 - e} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0.1n}} \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

Où :

t (s) : Temps d'écoulement de l'air pour l'échantillon à tester.

e : Porosité du lit d'échantillon préparé. Pour les ciments (type I et II) : $e = 0.500 \pm 0.005$

ρ (g/cm³) : Densité de l'échantillon

η (Pa.s) : Viscosité de l'air à la température d'essai

K : Constante K



FIGURE 5.7 – perméabilimètre blaine

5.4.2 Essai de refus à 45 μm [ASTM C430]

Le principe de cet essai est de mesurer le pourcentage de refus de ciment sur un tamis de 45 μm , l'essai a été réalisé sur les cinq ciments suivant le procédure suivante :

- Une masse spécifique de chaque type de ciment a été placée dans une étuve à une température de 105°C pendant 24
- 30 g de poudre sèche ont été prélevés de chaque ciment et déposés sur un tamis de 45 μm , avant d'activer la souffeuse.
- On pèse à chaque fois le refus du tamis



FIGURE 5.8 – Appareillage de l'essai reufs à 45 μm

5.4.3 Essai de la masse volumique absolue [ASTM C188]

L'essai est réalisé en utilisant un pycnomètre et du toluène, selon la procédure suivante :

- Calcul de m_1 : la masse du pycnomètre vide.
- Calcul de m_2 : la masse du pycnomètre rempli d'eau distillée.
- Calcul de m_3 : la masse du pycnomètre rempli de toluène.
- Si ρ_e est la masse volumique de l'eau à la température de l'essai, alors le volume du pycnomètre est $V = \frac{m_2 - m_1}{\rho_e}$.
- La masse volumique du toluène est alors $\rho_t = \frac{m_3 - m_1}{V}$.
- On remplace une masse m_t de toluène par une masse m_4 de ciment, telle que $m_4 = 20$ g. La masse de toluène (m_t) remplacée par la masse de ciment (m_4) est donnée par $m_t = m_3 - (m_5 - m_4)$.
- Le volume de toluène remplacé par le liquide est $v_c = \frac{m_t}{\rho_t}$.
- La masse volumique du ciment sera donnée par $\rho_c = \frac{m_4}{v_c}$.

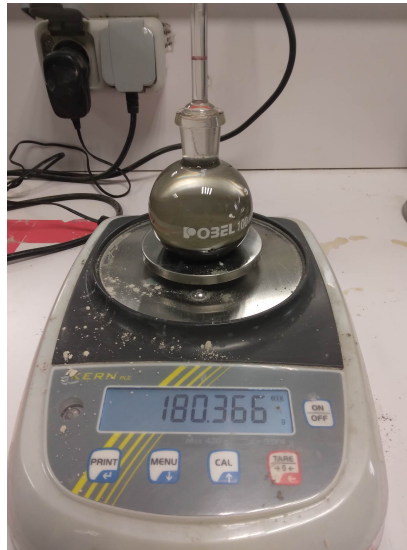


FIGURE 5.9 – masse du pycnomètre rempli de toluène

5.5 Formulation des BAP

5.5.1 Choix de dosage des granulats (Méthode de compacité)

Afin de déterminer le dosage optimal des granulats, nous avons choisi de réaliser l'essai de compacité des granulats selon la norme ASTM C29/C29M. Voici la procédure de l'essai :

- Prélever un échantillon de 3 kg de sable 0/1 et 3 kg de sable 0/4
- Utiliser un récipient d'une capacité de 1 litre.
- Commencer par le premier remplissage sur 3 couches en utilisant un mélange de 100 % de sable 0/1 et 0% de sable 0/4.
- Effectuer 12 coups sur chaque couche pour éliminer les vides et compacter le mélange.

- Pour chaque remplissage suivant, augmenter progressivement le pourcentage de sable 0/4 et diminuer celui de sable 0/1.
- Après chaque remplissage, peser le mélange, et noter la masse (M) obtenue.
- Le pourcentage optimal sera celui qui donnera la plus grande masse (M) lors du dosage. Il indiquera le dosage qui permet d'obtenir la meilleure compacité du mélange. Afin de déterminer le dosage optimal des graviers, nous avons réalisé le même essai en utilisant 5 kg de gravier 3/8 et 5 kg de gravier 8/15, avec un récipient d'une capacité de 5 litres.



FIGURE 5.10 – Un mélange composé de 90% de sable 0/4 et de 10% de sable 0/1 dans un réceptent

5.5.2 Choix de dosage d'eau et de superplastifiant

La méthode de mortier de béton équivalent (MBE) , est utilisée pour déterminer le dosage optimal d'eau et de superplastifiant dans le mélange de BAP. Les étapes de la méthode sont les suivantes :

- Calculer la surface spécifique des sables et des graviers
- Supposer un dosage d'eau égal à 0,4% du poids du ciment.
- Un dosage 430 kg/m³ est choisi forfaitairement
- Supposer un dosage de superplastifiant égal à 0,66% du poids du ciment.
- Elaborer une formule de base des BAP par la méthode des volumes absolus afin de fixer les quantités de granulats initiaux
- Remplacer le dosage de gravier par le dosage de sable, en maintenant la même surface spécifique, en veiller à ce que la surface spécifique du sable ajouté soit équivalente à celle du gravier remplacé.
- Formuler un mortier en utilisant les dosages fixés de ciment, d'eau, de superplastifiant et de sable.
- Mesurer l'étalement et l'écoulement du mortier pour évaluer sa maniabilité et son aptitude à l'auto-plaçage.
- Ajuster le dosage d'eau et de superplastifiant pour obtenir un mortier autoplaçant qui satisfait aux critères de maniabilité et d'écoulement souhaités. Le dosage d'eau et de superplastifiant ainsi déterminé est ensuite utilisé dans la formulation du BAP

5.6 Essais sur le BAP à l'état durci

5.6.1 Essai de la résistance à la compression (EN 12390-3)

Dans le but d'évaluer la résistance à la compression des BAP , l'essai de compression est réalisé sur des éprouvettes de béton de dimensions $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$, qui ont été préparées pour chaque type de ciment et pour chaque durée de durcissement (2, 7 jours et 28 jours) . Le principe de cet essai est de soumettre les éprouvettes à une charge de compression croissante jusqu'à leur rupture, (figure. 5.11), qui est détectée par la machine lorsqu'une déformation brutale se produit. La contrainte de rupture est automatiquement calculée par la machine.

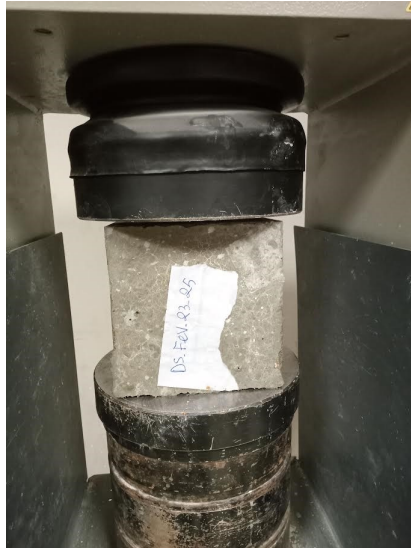


FIGURE 5.11 – Écrasement des éprouvettes

5.6.2 Essai de la perméabilité au gaz (méthode de Cembureau)

L'objectif de cet essai est d'évaluer la capacité du BAP à permettre le passage du gaz à travers sa structure. Afin de réaliser cet essai 3 éprouvettes de béton de dimensions $150 \times 5 \text{ mm}$ ont été préparé et stockés pendant 28 jours, Le procédé de l'essai est le suivant :

- Après avoir été séchées pendant 24 heures à une température de 105°C , les éprouvettes sont ensuite surfacées à l'aide d'une surfaceuse spéciale pour obtenir une surface lisse et uniforme
- Pour créer un flux de gaz unidirectionnel, les faces circulaires externes des cylindres de béton sont recouvertes d'un film en aluminium
- Un cylindre de béton a été inséré dans la chambre du dispositif (figure. 5.12)
- la chambre à air a été progressivement remplie d'air à l'aide d'un compresseur jusqu'à atteindre une pression minimale de 8 bars
- Une bouteille de gaz (Azote) est ouverte, et une pression de sortie de 3 bars est fixée.
- La pression de 3 bars est appliquée sur l'échantillon de béton.
- À l'aide de la poire du dispositif, une bulle de savon est créée et son temps de traversée des deux graduations extrêmes d'un des tubes gradués est mesuré
- Le débit volumique est calculé ensuite en multipliant la vitesse de la bulle sur la surface de tube

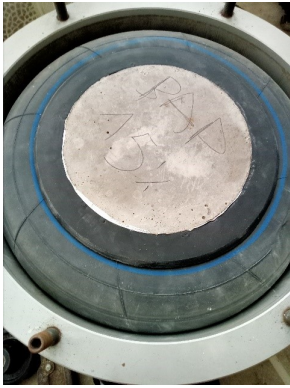


FIGURE 5.12 – Epreuve de béton dans la chambre du dispositif



FIGURE 5.13 – Epreuve de béton après surfacage

5.6.3 Essai de la perméabilité à l'eau (prEN 12364)

L'objectif de l'essai est de déterminer la capacité d'absorption d'eau d'un échantillon de béton. Pour réaliser cet essai, des éprouvettes de béton de dimensions 150 150 150 mm³ ont été préparées pour chaque type de béton. La procédure de l'essai est la suivante :

- Les éprouvettes sont stockées pendant 28 jours.
- Les tanks sont remplis d'eau.
- Les cubes de béton sont positionnés dans les emplacements dédiés à l'essai en utilisant un joint en caoutchouc pour prévenir toute fuite d'eau pendant la durée de l'essai.
- Les échantillons sont fixés en place à l'aide d'un levier pour assurer une stabilité optimale lors de l'application de la pression d'eau .
- Les échantillons sont soumis à une pression d'eau de 5 bars, qui est maintenue en utilisant un compresseur d'air pendant une période de 72 heures.
- Une fois l'essai de pénétration à l'eau terminé, l'échantillon est retiré du dispositif et immédiatement soumis à un essai de fendage brésilien, où il est fractionné en deux parties (Figure 5.15). Par la suite, la profondeur de pénétration de l'eau est mesurée avec une précision de 1 millimètre.



FIGURE 5.14 – Appareillage



FIGURE 5.15 – Essai fendage des éprouvettes

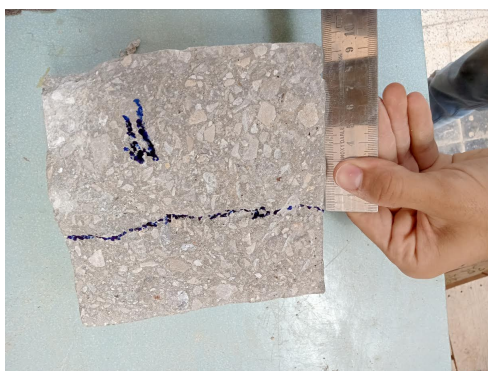


FIGURE 5.16 – Mesure de la profondeur de pénétration

5.6.4 Essai de retrait [ASTM 157/157M]

L'essai de retrait est effectué pour mesurer et quantifier les changements dimensionnels du béton au fil du temps. Il permet d'évaluer la tendance du béton à se contracter ou à se dilater, ce qui est important pour la conception et la durabilité des structures en béton. Pour réaliser cet essai, des éprouvettes de dimensions $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$ ont été préparées. Il est possible d'équiper les extrémités des échantillons de plots en laiton qui servent de points de référence. Des billes métalliques sont ensuite placées sur ces plots et sont en contact avec un comparateur lors des prises de mesures. Le comparateur permet de mesurer les variations de déplacement ou de déformation des billes métalliques au fil du temps (Figure 5.17).



FIGURE 5.17 – Essai de retrait

5.6.5 Essai d'absorption capillaire [ASTM C1585]

L'objectif de l'essai d'absorption capillaire est de mesurer la capacité du BAP à absorber l'eau par capillarité. L'essai se déroule comme suit :

- Préparation des éprouvettes cylindriques de $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$ et stockage pendant 28 jours.

- Mise des éprouvettes dans une étuve pendant 24 heures.
- Division de chaque éprouvette en deux parties à l'aide d'une scie à disque en acier.
- Pesée individuelle de chaque moitié de l'éprouvette pour obtenir la masse sèche initiale (m_0).
- Application uniforme de la résine sur la surface de chaque éprouvette, à l'exception de la partie immergée dans l'eau.
- Immersion des éprouvettes résinées dans un réservoir d'eau à une profondeur entre 1 et 3 mm.
- Essuyage léger des éprouvettes après 5 minutes d'immersion pour enlever l'excès d'eau en surface. Répéter cette opération après 30 minutes, 1 heure, 2 heures, 3 heures.
- Pesée de chaque moitié d'éprouvette et noter m .
- Répétition de la pesée après 24 heures d'immersion.
- Pour calculer l'absorption d'eau, on utilise la formule suivante :

$$I = \frac{m_t}{A \cdot d}$$

Où :

I : absorption d'eau (mm)

m_t : changement de masse dans une durée t (g)

A : aire de la section exposée dans l'eau (mm²)

d : densité de l'eau (g/mm³)



FIGURE 5.18 – Éprouvette résinée immergé dans l'eau

5.7 Conclusion

En conclusion, les essais effectués sur les granulats, le ciment et le BAP dans le cadre de notre projet de recherche, ont permis de recueillir des données précieuses sur la qualité et les propriétés du béton. Ces informations sont cruciales pour concevoir et produire un béton de qualité répondant aux exigences spécifiques de notre projet.

Chapitre 6

Matériaux utilisés

6.1 Introduction

Pour obtenir une formulation optimale du BAP, nous avons choisi différents matériaux spécifiques, chaque matériau a un rôle dans les propriétés et les performances du BAP. Dans ce chapitre nous allons présenter les différents matériaux utilisés dans notre étude.

6.1.1 Le verre et la poudre de verre

Dans notre projet de recherche, Le verre utilisé est issu de bouteilles pharmaceutiques, (Figure 6.1), environ 60 kg de bouteilles ont été broyées dans un broyeur à boulets (Figure 6.2), ces dimensions sont 1m de largeur et 0,48 de diamètre.

Il est a noter que les bouteilles de verre sont nettoyées préalablement et ne contiennent pas d'étiquettes, pour garantir des résultats fiables avec l'élimination de toute impureté qui pourrait affecter les expériences



FIGURE 6.1 – Bouteilles de verre



FIGURE 6.2 – Broyeur à boulets

Au cours du processus de broyage, à chaque deux mille tours que le broyeur fait, un échantillon de poudre de verre est prélevé pour mesurer sa SSB. Le broyage a été arrêté après huit mille tours lorsque la SSB a atteint $7000 \text{ cm}^2/\text{g}$, (Figure 5.3).

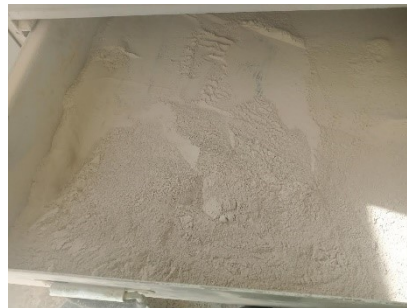


FIGURE 6.3 – Poudre de verre, $\text{SSB}=7000 \text{ cm}^2/\text{g}$,

6.2 Ciments

Le ciment utilisé est un CEM 1, produit à la cimenterie de Lafarge à Oggaz, (tableau 6.1) . Ce ciment a été mélangé avec différents pourcentages de poudre de verre (15%, 20%, 25%, 30%) dans le broyeur à boulets. Environ 300 tours ont été effectués lors de ce processus. 5 types de ciment ont été confectionnés, comme mentionné dans le tableau 6.2 .

TABLE 6.1 – Caractéristiques chimiques du ciment

Produit	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	Na_2O	MgO	SO_3	(Cl^-)
Valeur (%)	19,24	4,35	3,04	63,21	0,64	0,20	0,62	3,26	2,66	0,04

TABLE 6.2 – Différents ciments confectionnés

Ciment	01	02	03	04	05
CEM1	100%	85%	80%	75%	70%
Poudre de verre	0%	15%	20%	25%	30%

6.3 Graviers

Comme mentionné précédemment, le BAP nécessite des granulats d'un diamètre qui ne dépasse pas 15mm, donc nous avons utilisé deux types de graviers provenant de la Carrière Kaf-Azrou, présentant des granulométries différentes. Le premier gravier à une granulométrie de 3/8 (Figure 6.4), et le deuxième gravier avait une granulométrie de 8/15 (Figure 6.5).



FIGURE 6.4 – Gravier 3/8



FIGURE 6.5 – Gravier 8/15

6.4 Sables

Dans notre étude, nous avons utilisé deux types de sable pour la formulation du BAP, un sable fin provenant du carrière de Boussaada, (Figure 6.6), avec une granulométrie de 0/1, et un deuxième sable provenant du carrière de Kaf Azrou (Figure 6.7) , avec une granulométrie de 0/4.



FIGURE 6.6 – Sable 0/1



FIGURE 6.7 – Sable 0/4

6.5 L'adjuvant

Pour garantir la fluidité et la plasticité du BAP , nous avons utilisé un adjuvant super- plastifiant appelé « Master Gluenuim 26 », ce dernier est un adjuvant liquide fabriqué par SIKKA, à base d'éther poly carboxylique modifié., ses caractéristiques sont présentées dans le tableaux ci-dessous

TABLE 6.3 – Caractéristiques du superplastifiant

Grandeur	Valeur
Masse volumique	1.085 g/cm ³
pH	6,0
Teneur des ions chlorure	< 0,1%
Equivalent d'oxyde de sodium	< 2%

Afin de déterminer le dosage nécessaire du superplastifiant , nous avons opté pour la méthode de mortier de béton équivalent (MBE) , cette méthode a abouti un dosage de 0,98% du poids de ciment en superplastifiant .

6.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mettre en évidence l'importance des différents matériaux utilisés dans la formulation de BAP et de présenter les choix spécifiques que nous avons faits pour atteindre nos objectifs.

Chapitre 7

Résultats et interprétations

7.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous examinerons les résultats issus des expériences mentionnées précédemment, en les accompagnants de modestes interprétations qui nous permettront de mieux comprendre les phénomènes observés. Les différentes caractéristiques des ciments anhydres et des BAP seront analysées afin d'évaluer l'impact de l'ajout de poudre de verre finement broyée.

7.2 Essai des sur les sables

Comme observé dans le tableau 7.1, le sable de type 0/1 a un équivalent de sable de 73%, ce qui indique que le sable est propre. Le type 0/4 présente un équivalent de sable de 58%, ce qui est légèrement inférieur à la valeur recommandée de 60%. Cependant, la valeur de bleu de méthylène du sable 0/4 est égale à 0,16, ce qui indique l'absence d'argile dans le sable. Par conséquent, il peut toujours être utilisé dans des projets de construction.

Le module de finesse du sable 0/4 est plus élevé que le sable 0/1, cela indique que le sable 0/4 contient une quantité plus importante de particules fines que le premier sable.

Pour le coefficient d'absorption d'eau, Dans le cas du sable 0/1, le coefficient d'absorption est de 0,25%. Cela indique que ce sable a une capacité d'absorption relativement faible, ce qui signifie qu'il est moins susceptible d'absorber rapidement et efficacement l'eau.

TABLE 7.1 – Résultats des essais sur le sable

Type de sable	ES	VB	MF	Taux de fines	Coeff d'absorption
0/1	73%	1.3	1.37	1.9%	0.25
0/4	58%	0.16	2.8	15%	0.58

7.3 Essais sur les gravier

En regardant les résultats de taux de fines on remarque que le gravier 8/15 présente un taux de fine plus bas que celui de gravier 3/8, indiquant une proportion très faible de fines particules. Cela suggère une distribution granulométrique. Le coefficient d'aplatissement du gravier de taille 3/8 est de 14,2%, ce qui suggère une tendance vers des particules plus aplaties ou allongées par rapport au gravier de taille 8/15 qui a un coefficient d'aplatissement =12,60. Un coefficient d'aplatissement élevé indique une forme des particules moins sphérique et plus allongée.

En ce qui concerne le coefficient d'absorption, Le coefficient d'absorption est de 1,83%. Cela suggère que ce gravier de taille 3/8 a une capacité d'absorption d'eau modérée. Il peut absorber une quantité significative d'eau, c'est le même cas pour le gravier 8/15 qui a un coefficient d'absorption = 1,56% , qui Légèrement faible que celui de 3/8

TABLE 7.2 – Résultats des essais sur les graviers

Gravier	Taux de fines (%)	Coefficient d'aplatissement	Coefficient d'absorption (%)
3/8	2,93	14,2	1,83
8/15	0,9	12,60	1,56

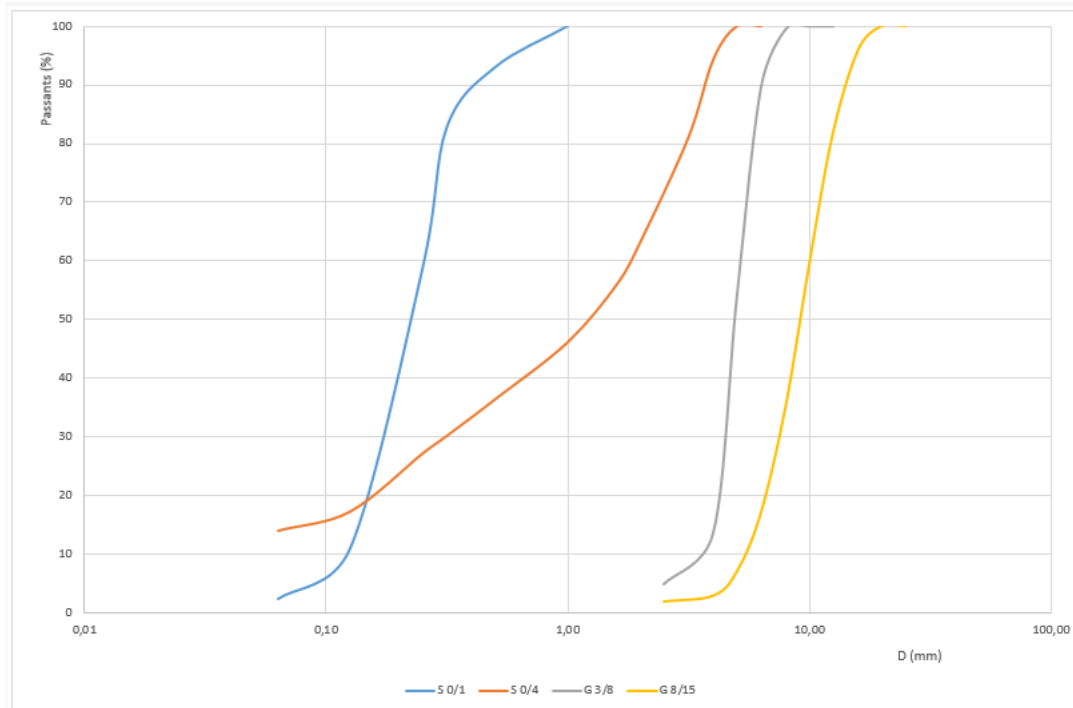


FIGURE 7.1 – Courbes granulométriques des sables et des graviers

7.4 Essais sur ciments

Les ciments mélangés avec de la poudre de verre présentent une finesse plus élevée par rapport au ciment témoin, et cela est effectivement dû à la finesse de la poudre de verre utilisée dans le mélange 7000 g/cm^3 . Toutefois, il existe une anomalie dans la surface spécifique blaine des ciments, et cette différence est causée par la méthode de mélange utilisée pour malaxer la poudre de verre et le ciment. En effet, le processus de mélange dans un broyeur à boulets peut varier légèrement d'une utilisation à l'autre, ce qui rend impossible d'obtenir exactement la même valeur de SSB. Bien que l'on s'attendait à ce que la résistance SSB augmente avec l'augmentation du dosage de substitution partielle du ciment par la poudre de verre plus fine ($\text{SSB PV} = 7000 \text{ cm}^2/\text{g}$), nous observons une légère régression au-delà de 20% de substitution. Cependant, cette régression demeure dans une plage relativement restreinte, ce qui peut être considéré comme négligeable.

L'ajout de poudre de verre dans le ciment a entraîné une diminution significative de la densité globale du mélange. Cela est principalement dû à la faible densité de la poudre de verre elle-même. Cette diminution peut diminuer la réaction chimique du ciment, ce qui est bien pour le béton.

L'augmentation du pourcentage de poudre de verre dans le mélange de ciment entraîne une diminution significative du refus 45, l'ajout de la PV, qui est un matériau finement broyé, implique une introduction des particules plus fines dans le mélange. Ces particules sont donc susceptibles de passer à travers le tamis, réduisant ainsi le refus 45.

TABLE 7.3 – Résultats des essais sur le ciment

Pourcentage de la PV dans le ciment (%)	SSB (cm/g ²)	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Refus à 45µm (%)
0	4010	3,15	5,5
15	4416	3,07	5,2
20	4320	2,92	4,9
25	4300	2,86	4,5
30	4175	2,75	4

7.5 Formulation et essais sur BAP

7.5.1 Optimisation de dosage sables et des graviers

Le résultat de l'essai de compacité indique que le mélange le plus compacte obtenu se compose de 20% de sable 0/1 et de 80% de sable 0/4 (tableaux 7.6) . De plus, pour le gravier, les résultats montrent une répartition équivalente avec 50% de gravier 3/8 et 50% de gravier 8/15, (tableaux 7.7)

La méthode MBE a permis de fixer un rapport E/C de 0,53 et un dosage d'adjuvant de 0,98% du poids du ciment. Les bétons confectionnés ont tous formulés avec les mêmes paramètres pour le sable et le gravier. La principale différence réside dans le pourcentage de ciment, qui a été réduit lors de l'ajout de poudre de verre. Les formules sont résumées dans le tableau 7.8 :

TABLE 7.4 – Optimisation du dosage des sables

Pourcentage de sable 0/1 (%)	Pourcentage de sable 0/4 (%)	Masse (g)
0	100	3025
10	90	3144
20	80	3396
30	70	3337
40	60	3215
50	50	3177
60	40	3144
70	30	3120
80	20	3097
90	10	3050
100	0	3035

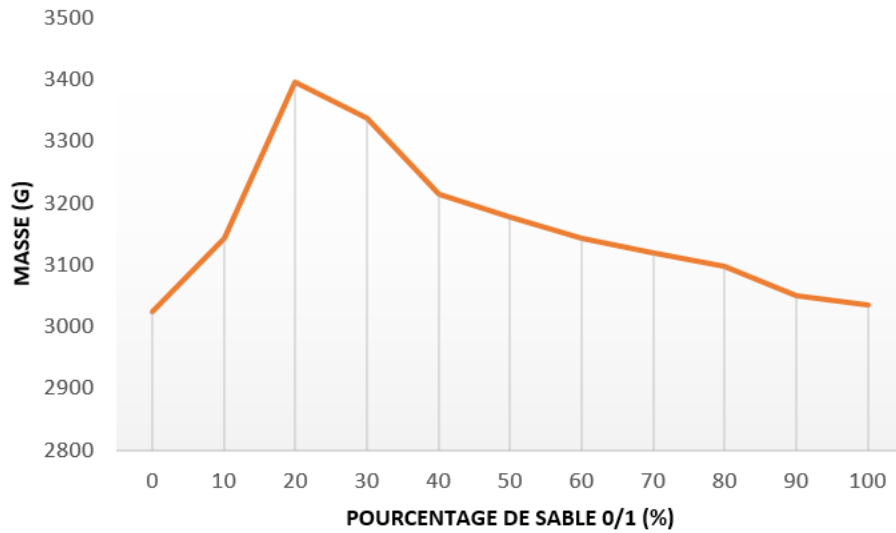


FIGURE 7.2 – Optimisation du dosage des sables

TABLE 7.5 – Optimisation du dosage des graviers

Pourcentage de gravier 3/8 (%)	Pourcentage de gravier 8/15 (%)	Masse (g)
0	100	7210
10	90	7225
20	80	7332
30	70	7440
40	60	7744
50	50	7905
60	40	7797
70	30	7654
80	20	7415
90	10	7220
100	0	6870

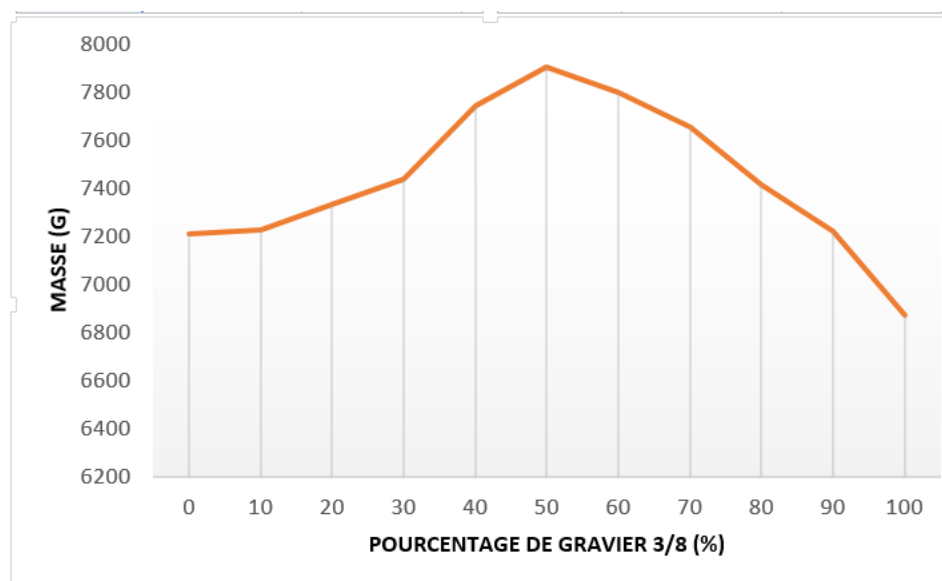


FIGURE 7.3 – Optimisation du dosage des graviers

7.5.2 Optimisation du dosage d'eau et d'adjuvant

Comme mentionné précédemment, afin de choisir les dosages d'eau et d'adjuvant, nous avons utilisé la méthode MBE. Il a été formulé plusieurs mortiers pour tester leur étalement et leur temps d'écoulement. Le dosage de gravier est substitué par le sable, en veillant à ce que la surface spécifique du sable ajouté soit équivalente à celle du gravier remplacé. Les résultats obtenus avec la méthode MBE sont présentés dans le tableau ci-dessous.

TABLE 7.6 – Formulations des mortiers

Mortier	Mortier 1	Mortier 2	Mortier 3
Ciment (kg/m ³)	430	430	430
Eau (kg/m ³)	193.5	227.9	227,9
E/C	0.45	0.53	0.53
Adjuvant (% CE)	0.68	0.98	1,02
Sable 0/1 (kg/m ³)	190,46	786,43	190,46
Sable 0/4 (kg/m ³)	786,43	786,43	786,43
Etalement (cm)	30	33	Ségrégation
Temps d'écoulement (seconds)	13	10	Ségrégation

Le mortier 2 présente un étalement de 33 cm et un temps d'écoulement de 10 secondes. Cependant, le dépassement du dosage d'adjuvant de 0,98% a provoqué une ségrégation du mélange, comme observé dans le mortier 3. Ainsi, les dosages optimaux sont un rapport E/L de 0,53 et un dosage d'adjuvant t de 0,98% par poids de ciment. Ces dosages ont été utilisés lors de la formulation du BAP.

7.5.3 Formules des BAP

Dans de notre étude, cinq bétons ont été formulés en maintenant le meme dosage de E/L et le même dosage d'adjuvant. Chaque béton contient un pourcentage de poudre de verre en tant que substitut partiel du ciment, allant de 0% à 30%.

Les bétons sont désignés par le code BAP_i, où i représente le pourcentage de la poudre de verre. Par exemple, le BAP 25 correspond au BAP avec un pourcentage de 25% de substitution partielle de ciment par la poudre de verre

Le tableau 7.7 , représente les différents BAP formulés

TABLE 7.7 – Les différents BAP formulés

BAP	Sable 0/1 (kg/m ³)	Sable 0/4 (kg/m ³)	Gravier 3/8 (kg/m ³)	Gravier 8/15 (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Adjuvant (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	PV (kg/m ³)
BAP 0	187	747	370	370	227.9	4.21	430	0
BAP 15	187	747	370	370	227.9	4.21	365.5	64.5
BAP 20	187	747	370	370	227.9	4.21	344	86
BAP 25	187	747	370	370	227.9	4.21	322.5	107.5
BAP 30	187	747	370	370	227.9	4.21	301	129

7.5.4 Essai d'étalement

L'utilisation de la poudre de verre dans le BAP présente des effets très bénéfiques sur son ouvrabilité. Lorsqu'une substitution de 30% est effectuée avec la poudre de verre, on observe un étalement de 690 mm, ce qui représente une amélioration de 6,15% par rapport au BAP témoin qui a un étalement de 650 mm. Cette amélioration notable peut être attribuée à deux facteurs clés : l'absence d'absorption de la poudre de verre et la surface lisse de ses grains

L'absence d'absorption de la poudre de verre signifie qu'elle ne retient pas d'eau lors du mélange. Cela permet de conserver une quantité adéquate d'eau, favorisant ainsi l'ouvrabilité du béton. La surface lisse des grains de poudre de verre joue un rôle crucial dans l'amélioration de l'ouvrabilité du BAP. Les grains de poudre de verre présentent une texture non rugueuse, réduisant ainsi la friction entre les grains de ciment. Cette caractéristique favorise la fluidité du mélange et le déplacement des particules, ce qui augmente l'étalement.

Des résultats similaires ont été obtenus dans l'étude menée par [Chekireb,2015], où il a été observé une augmentation de l'étalement de 665 mm à 20% de poudre de verre, et jusqu'à 730 mm à 40% de poudre de verre. [Boucette et al,2013] ont également constaté une augmentation de

l'étalement, passant de 600 mm sans ajout de poudre de verre à 850 mm avec 45% de poudre de verre.

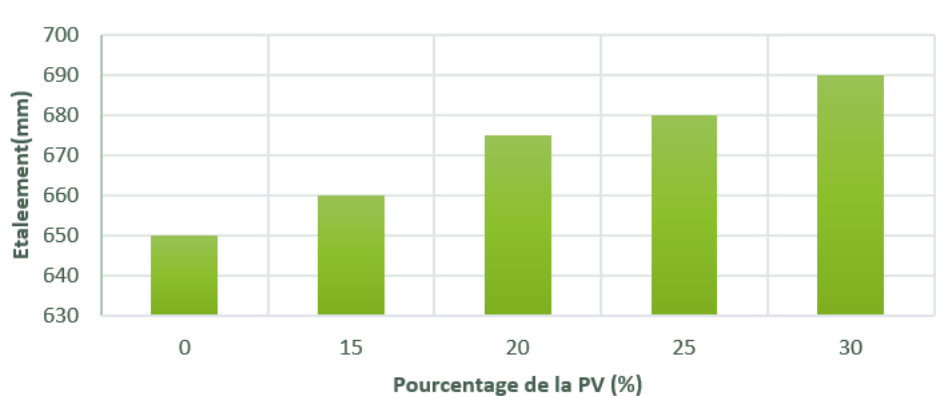


FIGURE 7.4 – Variation de l'étalement des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre

7.5.5 Essai de V funnel

L'ajout de poudre de verre dans le BAP jusqu'à 15% entraîne une diminution significative du temps d'écoulement par rapport au BAP témoin. Cette diminution atteint 18,33%. Cela signifie que le BAP devient plus fluide et s'écoule plus rapidement. Cependant, au-delà de la limite de 15% de substitution, le temps d'écoulement commence à augmenter progressivement. Avec une substitution de 30% de poudre de verre, le temps d'écoulement atteint une valeur de 7,5 secondes. Cette augmentation peut être attribuée à deux facteurs principaux : l'ajout excessif de poudre de verre qui peut entraîner une augmentation de la viscosité du mélange, et la finesse des particules de la poudre de verre qui peut également contribuer à une augmentation de la viscosité du mélange en formant des ponts entre les grains de ciment, ralentissant ainsi le mouvement des particules et augmentant le temps d'écoulement.

La tendance d'évolution du temps d'écoulement des BAP peut sembler contradictoire par rapport aux résultats d'étalement, mais il est important de comprendre que le temps d'écoulement n'est pas seulement un indicateur d'ouvrabilité, mais aussi un indicateur de la cinétique de fluidité et de la viscosité des mélanges. Ainsi, bien que le temps d'écoulement puisse augmenter avec l'ajout de poudre de verre, il ne faut pas interpréter cela comme une perte d'ouvrabilité du matériau. Au contraire, cette augmentation du temps d'écoulement est le reflet d'une viscosité accrue.

Il est important de noter que malgré cette augmentation significative de la quantité de poudre de verre, l'écoulement reste acceptable pour un BAP. Selon [Hwang et Coll, 2006], les BAP destinés à des applications structurales avec un étalement entre 620 mm et 720 mm doivent avoir un temps de V-funnel inférieur ou égal à 8 secondes.

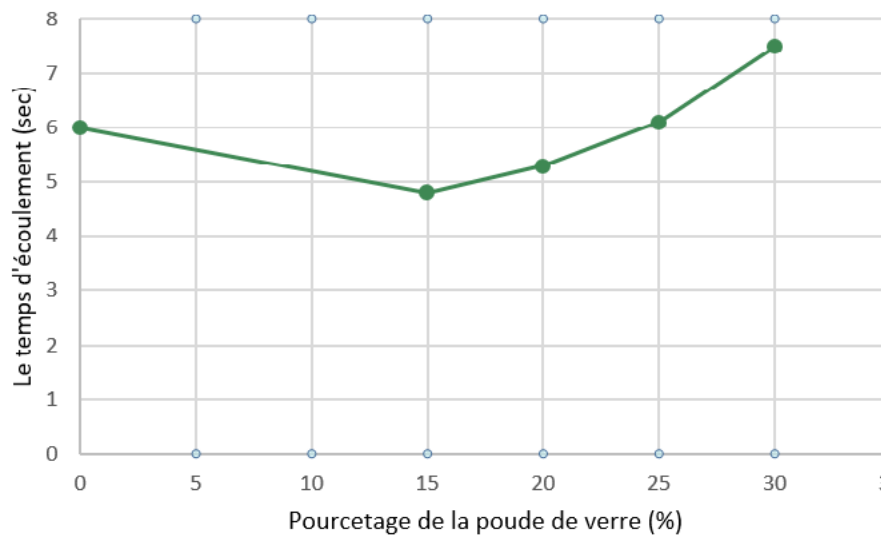


FIGURE 7.5 – Variation de l'écoulement des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.

7.5.6 Essai de la boîte en L

L'ajout de différentes quantités de poudre de verre aux mélanges de BAP présente des résultats satisfaisants en termes d'écoulement en milieu confiné. Lorsqu'aucune substitution n'est effectuée (0% de poudre de verre), le taux de remplissage du béton autoplacant est de 80%. En ajoutant de la poudre de verre jusqu'à 25% de substitution, le taux de remplissage du BAP augmente de manière significative. Il augmente de 16,25% pour atteindre un taux de remplissage de 93% à 25% de la poudre de verre. Cela indique une meilleure fluidité en milieu confiné. Cependant, au-delà de 25% de substitution, le taux de remplissage diminue légèrement pour atteindre 82%. Cela peut être dû à l'effet de la poudre de verre sur la fluidité du mélange. L'ajout excessif de poudre de verre peut augmenter la viscosité du BAP, ce qui peut affecter sa capacité à se répartir uniformément dans le moule. Cela peut entraîner une légère diminution du taux de remplissage. Malgré ces variations, il est important de noter que les résultats globaux des différents mélanges de BAP testés restent dans une plage acceptable de remplissage. Le taux de remplissage de 80% à 93% indique une bonne fluidité du BAP.

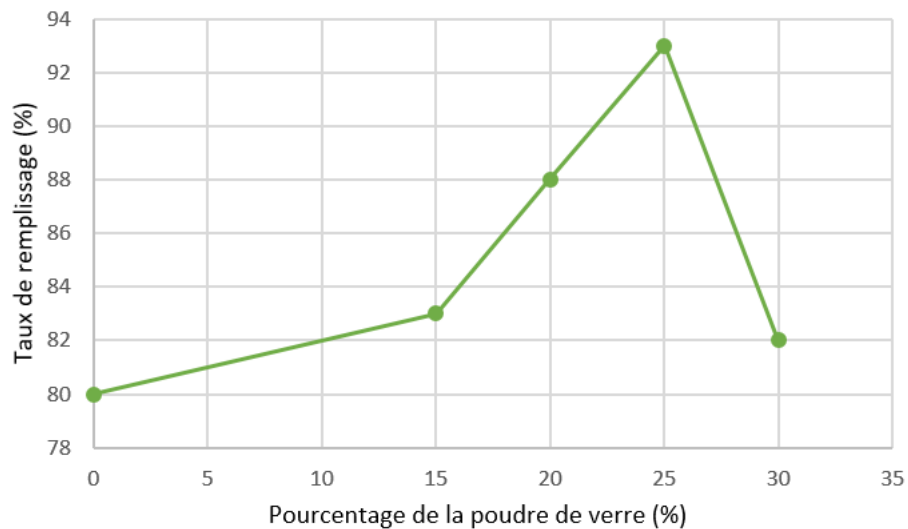


FIGURE 7.6 – Variation du taux de remplissage des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.

7.5.7 Essai de la stabilité au tamis

La figure 7.8, montre que tous les types de béton testés présentent une bonne résistance à la ségrégation, c'est-à-dire à la séparation des différents constituants du mélange. Cependant, des variations ont été observées en fonction du pourcentage de substitution de poudre de verre. Lorsqu'aucune substitution n'est effectuée (0% de poudre de verre), le béton présente une bonne stabilité et une bonne résistance à la ségrégation avec une valeur de 12.2%. Cependant, en ajoutant 15% de poudre de verre, une augmentation de 12,29% a été observée par rapport au béton témoin. Cela signifie que les différents composants du mélange ont une tendance légèrement accrue à se séparer, bien que la stabilité globale reste satisfaisante. Cependant, avec une substitution de 30% de poudre de verre, la ségrégation augmente davantage, atteignant une valeur de 15%. Cela représente une augmentation de 22,95% de la ségrégation par rapport au béton sans poudre de verre. Il est possible que l'ajout excessif de poudre de verre peut modifier les caractéristiques rhéologiques du mélange de BAP, ce qui peut affecter la résistance à la ségrégation entraînant une plus grande tendance à la séparation des matériaux.

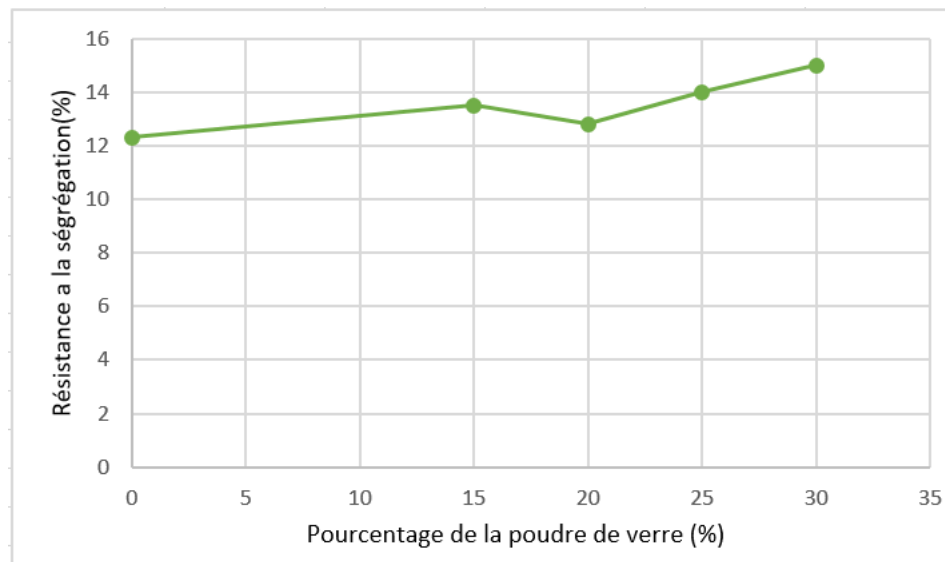


FIGURE 7.7 – Variation de la résistance à la ségrégation des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.

7.5.8 Essai de la résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression, montrent une diminution de la résistance pour le BAP contenant de la poudre de verre par rapport au béton témoin. À 28 jours, la résistance à la compression du BAP contenant 30% de poudre de verre est de 32 MPa, soit une diminution de 18 MPa par rapport au béton témoin dont la résistance est de 50 MPa. Cette diminution représente une réduction de 36% de la résistance à la compression. Cette diminution de la résistance à la compression peut être attribuée au fait que la réaction pouzzolanique de la poudre de verre n'a pas encore commencé à 28 jours. La poudre de verre agit en tant que matériau pouzzolanique, réagissant chimiquement avec la chaux présente dans le ciment pour former des produits de réaction additionnels qui renforcent le béton. Cependant, cette réaction nécessite du temps pour se produire pleinement, ce qui peut entraîner une résistance initialement inférieure du BAP témoin.

Des résultats similaires ont été obtenus par [Chekireb, 2015], qui a constaté qu'un béton contenant 20% de poudre de verre présente une résistance à la compression à 28 jours de 43 MPa, tandis qu'un béton avec 40% de poudre de verre atteint une résistance de 32 MPa.

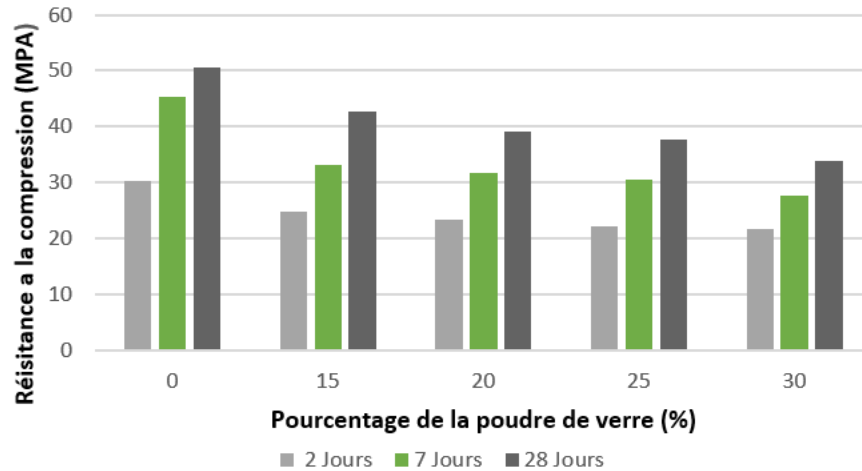


FIGURE 7.8 – Variation de la résistance a la compression des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.

7.5.9 Essai de l'absorption capillaire

L'utilisation de jusqu'à 30% de poudre de verre dans le BAP entraîne une diminution significative de l'absorption d'eau par capillarité, avec une réduction de 0,12 mm, ce qui représente une diminution de 50%. Cette diminution de l'absorption d'eau par capillarité peut être attribuée à la finesse élevée de la poudre de verre. En raison de sa texture fine, la poudre de verre est capable de remplir efficacement les pores du BAP. Cela limite l'espace disponible pour l'eau à pénétrer dans le matériau par capillarité. Les pores étant remplis par les particules de poudre de verre, l'eau a moins de possibilité de se déplacer à travers le matériau, ce qui réduit l'absorption d'eau par capillarité.

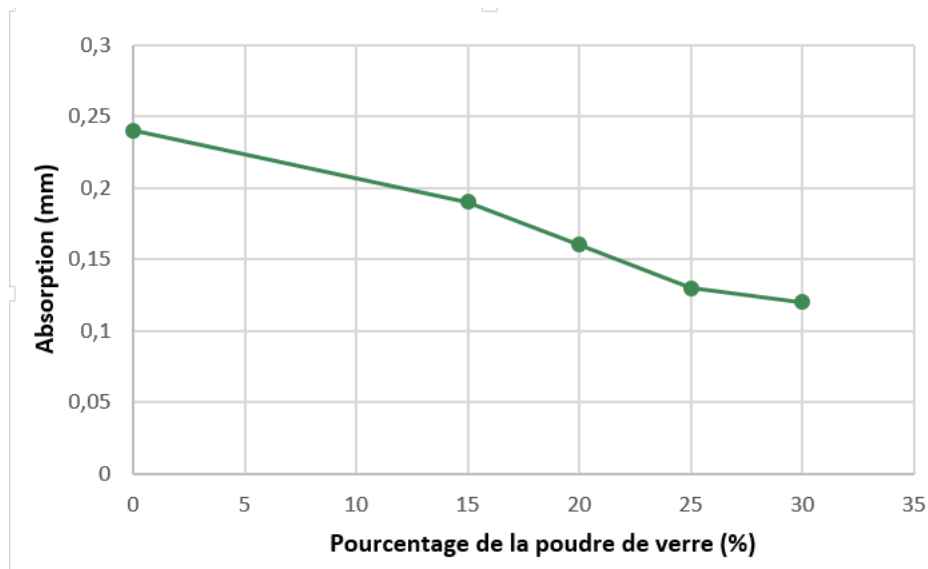


FIGURE 7.9 – Variation de l'absorption capillaire des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.

7.5.10 Essai de la perméabilité à l'eau

L'ajout de jusqu'à 30% de poudre de verre dans le BAP entraîne aussi une diminution significative de la perméabilité à l'eau. La valeur de perméabilité passe de 9 cm pour le béton témoin à 7,9 cm pour le béton contenant 30% de poudre de verre, ce qui représente une réduction d'environ 12,22%. Cette diminution de la perméabilité est principalement attribuée à l'effet filler de la poudre de verre. En tant que matériau finement broyé, la poudre de verre est capable de remplir les espaces vides entre les grains de ciment, réduisant ainsi les voies d'infiltration pour l'eau. Cela permet de former une structure plus dense et compacte dans le BAP, ce qui réduit la perméabilité du matériau.

Les mêmes résultats ont été observés dans l'étude réalisée par [Amroune, 2022], où un béton témoin a montré une perméabilité à l'eau de 14,6 cm, tandis qu'un béton contenant 25% de poudre de verre présente une perméabilité réduite à 13,5 cm.

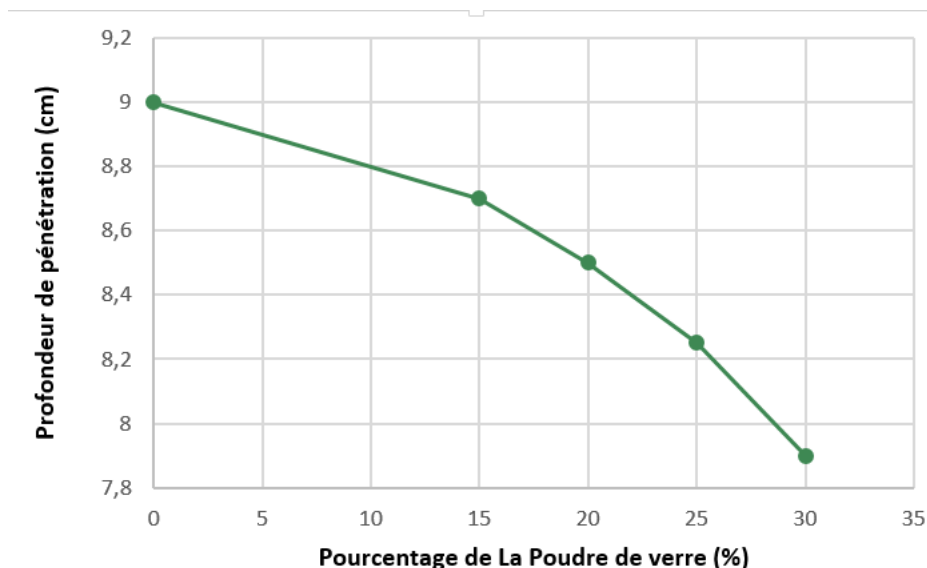


FIGURE 7.10 – Variation de la Pénétrabilité a l'eau des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.

7.5.11 Essai de la Perméabilité au gaz

L'ajout de poudre de verre jusqu'à 20% a entraîné une augmentation d'environ 12,09% du débit volumique par rapport au BAP témoin. Cependant, au-delà de cette substitution de 20%, On observe une diminution notable du débit volumique du gaz. À 30% de substitution, cette diminution atteint environ 41,86% par rapport au béton témoin. Ces variations mettent en évidence la complexité de l'effet de la poudre de verre sur la perméabilité au gaz. Ces résultats peuvent être dus à des différences d'écoulement dans les pores entre le gaz et l'eau. Il est possible que le gaz nécessite une quantité plus élevée de poudre de verre pour obstruer les pores et arrêter sa circulation, ce qui explique la diminution du débit observée lorsque le pourcentage de poudre de verre dépasse 20%. Il est important de souligner que malgré ces variations, le dosage de 30% de substitution partielle par la poudre de verre peut encore offrir des perméabilités au gaz et à l'eau inférieures à celles du BAP témoin. Cela suggère que le mélange avec 30% de poudre de verre peut présenter des avantages en termes de réduction des mouvements de gaz et d'eau à travers le BAP

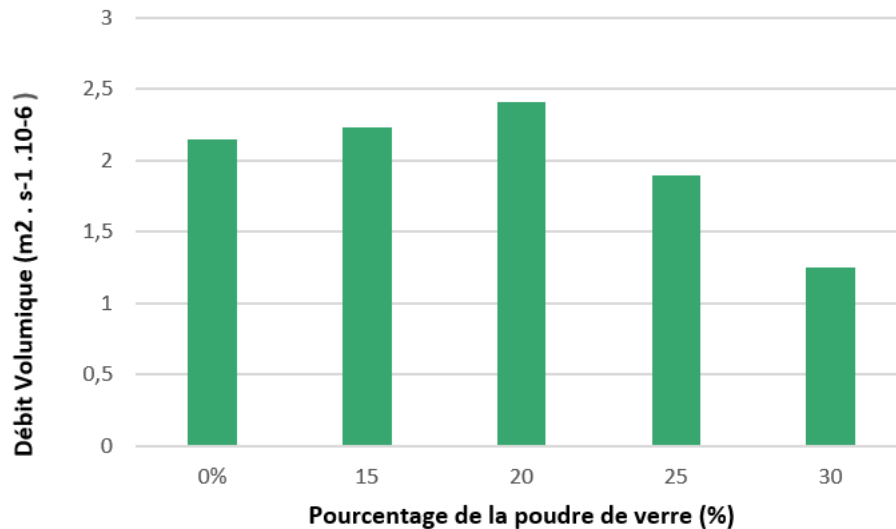


FIGURE 7.11 – Variation de la Perméabilité au gaz des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.

7.5.12 Essai de retrait

L'ajout de 30% de poudre de verre dans le BAP entraîne une diminution significative du retrait, avec une réduction de 0,15 mm à 28 jours par rapport au BAP témoin, ce qui représente une diminution de 30%. Cette diminution du retrait peut être attribuée à plusieurs facteurs. Tout d'abord, l'effet de remplissage de la poudre de verre dans le béton joue un rôle essentiel. En ajoutant de la poudre de verre, les vides entre les particules de ciment sont réduits, ce qui limite la quantité de retrait. La poudre de verre agit comme un matériau de remplissage, réduisant les espaces vides et améliorant ainsi la compacité du mélange. Cela contribue à une diminution globale du retrait du BAP. D'autre part, il convient de noter que l'ajout de poudre de verre entraîne une réduction de la quantité de ciment dans le mélange. En effet, une partie du ciment est partiellement remplacée par la poudre de verre. Cette réduction de la quantité de ciment peut également contribuer à la diminution du retrait.

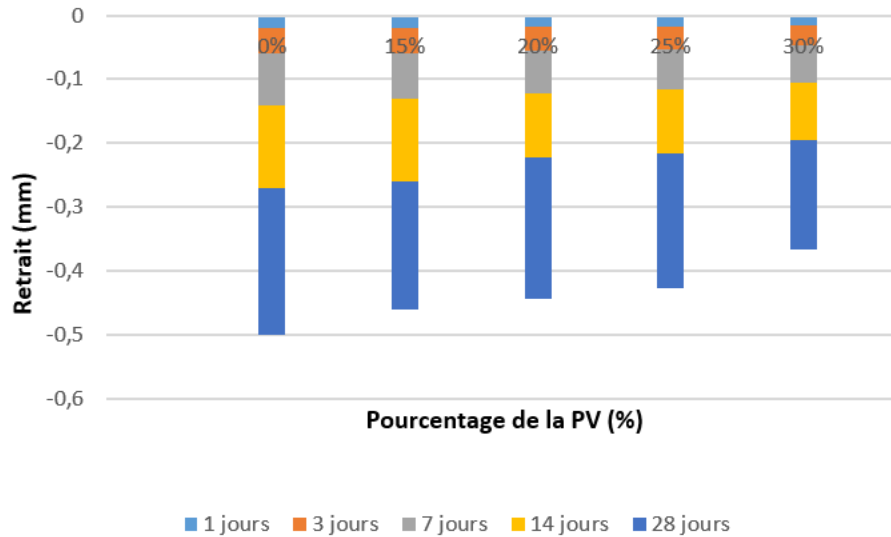


FIGURE 7.12 – Variation de retrait des BAP en fonction du pourcentage de poudre de verre.

7.6 Conclusion

En conclusion, l'ajout de poudre de verre dans le BAP présente des avantages significatifs. Il améliore l'ouvrabilité, réduit le retrait et diminue la perméabilité à l'eau. Les résultats des différentes études montrent des tendances similaires, où une substitution de poudre de verre jusqu'à un certain pourcentage conduit à des améliorations des propriétés du béton. Cependant, il est essentiel de trouver le dosage optimal pour obtenir les performances souhaitées.

Conclusion générale

L'utilisation de poudre de verre finement broyée dans le béton autoplacant présente plusieurs avantages en termes de durabilité, de performance structurelle et d'impact environnemental positif. La substitution du ciment par la poudre de verre peut être réalisée à des teneurs relativement élevées, qui peuvent aller jusqu'à 30%. Suite à cette étude de valorisation de la PV dans la fabrication de BAP, on a abouti aux conclusions suivantes :

- L'optimisation du squelette granulaire a été effectuée tout au départ par l'application de la méthode de compacité. Les résultats obtenus ont permis de fixer les dosages du sable reconstitué, composé de 20% de sable fin 0/1 et 80% de sable grossier 0. Concernant les gravillons, la meilleure compacité a été obtenue avec 50% de gravier 3/8 et 50% de gravier 8/15.
- La méthode du mortier équivalent a été utilisée pour la formulation des BAP. La MBE a permis de fixer le dosage de E/C à 0,53 et le dosage de superplastifiant à 0,98% du poids de ciment.
- L'effet de la PV sur l'ouvrabilité de BAP a été très positif, allant jusqu'à un étalement de 690 mm à 30% de substitution avec un gain de 6,15% par rapport au BAP témoin dont l'étalement était de 650 mm. Cet effet positif est attribué à la faible absorption de PV et aussi à la forme lisse de ces grains.
- L'ajout de poudre de verre au BAP jusqu'à 15% a entraîné une diminution du temps d'écoulement, à hauteur de 18,33% par rapport au BAP témoin. Cela indique que le BAP devient plus fluide et s'écoule plus rapidement. Cependant, au-delà de cette limite de 15% de substitution, le temps d'écoulement commence à augmenter jusqu'à atteindre une valeur de 7,5 secondes avec 30% de poudre de verre. Cette augmentation peut être attribuée à une viscosité accrue causée par l'ajout excessif de la poudre de verre ainsi que sa grande finesse. La tendance d'évolution du temps d'écoulement des BAP paraît contradictoire aux résultats d'étalement ; mais en réalité ce temps d'écoulement n'est pas seulement un indicateur d'ouvrabilité mais plutôt un indicateur de cinétique de fluidité qui est étroitement liée à la viscosité des mélanges. Autrement dit, les BAP formulés restent fluides mais avec une viscosité plus élevée ce qui leur procure une bonne résistance à la ségrégation.
- L'ajout de différentes quantités de poudre de verre aux mélanges de BAP donne des résultats satisfaisants en termes d'écoulement en milieu confiné. À 0% de substitution, le taux de remplissage de la boîte en L, est de 80%. Ce taux augmente significativement avec un gain de 16,25% pour atteindre une valeur de 93% jusqu'à 25% d'ajout de PV. Cependant, au-delà de 25% de substitution, le taux de remplissage diminue légèrement pour atteindre une valeur de 82% supérieure à celle du témoin. Ces variations dans le taux de remplissage peuvent être attribuées à l'effet de la poudre de verre sur la compacité et la fluidité du BAP. À préciser que les résultats globaux restent conformes aux spécifications exigées pour tous les BAP formulés. - L'essai de stabilité au tamis a révélé que tous les types de béton testés ont une bonne résistance à la ségrégation. Une augmentation de 12,29% de la ségrégation a été observée en passant de 0% à 15% de substitution de poudre de verre. Cependant, avec une substitution de 30%, la ségrégation est de 15%, ce qui correspond à une augmentation de 22,95% par rapport au béton témoin. L'ajout excessif de poudre de verre peut modifier les caractéristiques rhéologiques du mélange de BAP, ce qui peut diminuer la résistance à la ségrégation, qui tout de même conforme aux seuils stipulés par la réglementation.
- concernant la résistance à la compression, on observe une diminution des résistances des BAP contenant de la poudre de verre par rapport au béton témoin. La diminution de résistance à 28 jours est de 18 MPA, passant de 50 MPA pour le béton témoin à 32 MPA pour le BAP

contenant 30% de poudre de verre, ce qui représente une diminution de 36%. Cette diminution de la résistance à la compression peut être attribuée au fait que la réaction pouzzolanique de la poudre de verre n'a pas encore commencé. En réalité cette réaction se manifeste à long terme au-delà de 90 jours. Fautes de temps il nous a pas été possible d'aller jusqu'à cet âge. Il est important de souligner que malgré cette diminution, tous les BAP testés ont des résistances à la compression appréciables (supérieures à 32 MPA)

- L'ajout de 30% de la poudre de verre dans le BAP entraîne une diminution du retrait, avec une réduction de 0,15 mm (soit une diminution de 30%) à 28 jours. Cette diminution du retrait est due à l'effet de remplissage de la poudre de verre dans le béton, réduisant ainsi les vides et limitant la quantité de retrait d'un côté, d'un autre coté il faut rappeler que la quantité de ciment à diminuer dans le mélange suite à la substitution partiel par la PV ce qui est une autre raison éventuelle pour la diminution du retrait, dont le ciment est la principale cause. Concernant les essais de durabilité, les résultats obtenus ont permis de faire les conclusions suivantes :
- L'ajout de 30% de poudre de verre dans le BAP entraîne une diminution de l'absorption de l'eau par capillarité de 0,12 mm, soit une réduction de 50% par rapport au témoin. Cette diminution est liée à la finesse élevée de la poudre de verre, qui favorise le remplissage des pores du BAP et limite ainsi la capacité d'eau à pénétrer à travers le matériau. Cette réduction de l'absorption d'eau peut améliorer la pérennité des BAP en limitant les dommages causés par le transfert de l'eau et des agents agressifs dans la matrice du béton.
- L'ajout jusqu'à 30% de poudre de verre entraîne une diminution de la perméabilité à l'eau des BAP aussi, passant de 9 cm à 7,9 cm. Cela représente une diminution d'environ 12,22% de la perméabilité par rapport au BAP de référence. Cette diminution est aussi expliquée par l'effet filler que joue la poudre de verre dans la matrice du BAP. Ce qui entrave la pénétration de l'eau, réduisant ainsi la perméabilité.
- Concernant la perméabilité au gaz, l'ajout jusqu'à 20% de poudre de verre a entraîné une augmentation d'environ 12,09% du débit volumique par rapport au BAP témoin. Cependant, au-delà de cette substitution de 20%, nous avons constaté une diminution notable du débit volumique du gaz, atteignant environ 41,86% de diminution à 30% de substitution. Ces variations suggèrent que l'effet de la poudre de verre sur la perméabilité au gaz est complexe. Différentes interactions et mécanismes d'écoulement peuvent être en jeu, influençant la perméabilité du matériau. Cela souligne l'importance de trouver le bon dosage de poudre de verre pour atteindre les propriétés souhaitées du BAP . De ce faite dans notre cas il nous a parait plus pertinent de considérer le dosage de 30% de substitution partiel par la poudre de verre qui procure les meilleures perméabilités au gaz et à l'eau inferieures à celle de BAP témoin.

Globalement, à travers cette étude, nous avons constaté que la substitution de 30% de ciment par la poudre de verre dans le béton autoplaçant a conduit à des performances positives, notamment en matière d'ouvrabilité et de durabilité. Concernant les résistances à la compression, elles sont inférieures à celles du BAP témoin. Néanmoins, il faut souligner deux points :

- Les résistances à la compression évaluées à 28 jours ne sont pas suffisantes pour trancher sur les performances mécaniques des BAP. Des essais de résistance à la compression sont nécessaires au-delà de 90 jours pour pouvoir donner un jugement sur l'influence de la poudre de verre sur la résistance à la compression, car la réaction pouzzolanique de ce type d'ajout se manifeste généralement à long terme. Il est fort probable qu'à des âges avancés, ces résistances dépasseront celles du BAP témoin. Malheureusement, faute de temps, il ne nous a pas été possible de réaliser ces essais de longue durée.

- Il faut souligner que les résistances à la compression de différents bétons sont appréciables et atteignent des valeurs acceptables supérieures à 32 MPA.

L'utilisation de poudre de verre finement broyée dans le béton autoplaçant présente plusieurs avantages en termes de durabilité, de performance structurelle et d'impact environnemental positif. La substitution du ciment par la poudre de verre peut être réalisée à des teneurs relativement élevées, pouvant aller jusqu'à 30%. L'utilisation de la poudre de verre dans la construction offre plusieurs avantages :

- Le remplacement partiel du ciment par la poudre de verre réduit considérablement les émissions de gaz à effet de serre associées à la production de ciment, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.
- La poudre de verre permet également de préserver les ressources naturelles en évitant une consommation excessive de matériaux de construction.
- L'utilisation de la poudre de verre en tant que substitut partiel du ciment présente un impact environnemental positif, s'alignant ainsi sur une approche globale de développement durable. En combinant les avantages écologiques, tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre, avec les avantages liés à la durabilité et à la performance du béton, cette solution offre une alternative prometteuse pour l'industrie de la construction.

Perspectives :

A la fin de cette modeste étude limitée dans le temps, plusieurs questions sont restées sans réponses et nécessitent d'autres essais pour plus d'éclaircissements. Dès lors plusieurs perspectives ont en découlé, énumérées dans ce qui suit :

- Elargir l'étude à d'autres dosages de ciment, en dehors de la quantité de 430 kg/m³. Cela nous permettrait de comprendre les effets et les résultats obtenus lorsque le dosage de ciment diffère de cette valeur.
- Étudier des dosages de poudre de verre plus élevés, allant jusqu'à 60%. Cette approche permettrait d'évaluer les effets et les performances du béton autoplaçant lorsque le pourcentage de substitution du ciment par la poudre de verre est plus élevé que celui précédemment étudié.
- Étudier les performances à long terme du béton autoplaçant contenant de la poudre de verre en prolongeant la durée des essais au-delà de 90 jours.
- Approfondir l'étude de la rhéologie des bétons autoplaçants à base de poudre de verre. Cela permettrait de mieux comprendre le comportement du matériau, notamment en termes d'écoulement, de fluidité et de viscosité.

Bibliographie

ABIB, Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants, thèse de magister USTHB, 2004

Ammar Yahia ,Jani, et Hoglan, William. Waste glass in the production of cement and concrete–A review. *Journal of environmental chemical engineering*, 2014, vol. 2, no 3, p. 1767-1775

Amroun Sofiane. Caractérisation de nouveaux ciments à base de verre finement broyé et étude de leurs durabilité et résistances. 2022. . Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique

Assié Stéphan. Durabilité des bétons auto-plaçants. 2004. Thèse de doctorat. Toulouse, INSA.

Association française de Génie Civil (AFGC) « Bétons Autoplaçants Recommandations provisoires » 2000.

ASTM C618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

Baron et Ollivier , Les béton :bases et données pour leur formulation,Eyrolles,1999

Bencheikh Amel. Contribution à la caractérisation d'un ciment à base du laitier+ 5% de calcaire. 2016. Mémoire de Master . Université Mohamed Boudiaf-M'sila.

Voici la suite de votre code LaTeX corrigé :

“`latex` Bensebti.S.E. «Formulation et propriétés des béton autoplaçants à base des matériaux locaux , Thèse doctorat, Université Mentouri de constantine, juillet 2008.

Boucetta , Tahar, BEHIM, B., et LAIFA, L. Valorisation du laitier granulé et de la poudre de verre dans les bétons autoplaçants (BAP). *Rev. Sci. Technol. Synthèse*, 2013, vol. 27, p. 30-39.

Boukni Bariza , teneu en feu des betons autoplaçant,these de magister, Universite mentouri constantine,2007

Catherine et Schwartzentruber. La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)–Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés. *Materials and structures*, 2000, vol. 33, no 8, p. 475. Chekireb sihem. valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant. 2015. Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke.

De Larrard. Structures granulaires et formulation des bétons. 2000.

Domone, P. L. Self-compacting concrete : An analysis of 11 years of case studies. *Cement and concrete composites*, 2006, vol. 28, no 2, p. 197-208.

Dron, R. et Voinovic, I. A. Activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes. *Le béton hydraulique*. ENPC, Paris, 1982, p. 237-246.

DU, Hongjian et TAN, Kiang Hwee. Use of waste glass as sand in mortar : Part II–Alkali–silica reaction and mitigation methods. *Cement and Concrete Composites*, 2013, vol. 35, no 1, p. 118-126.

Gibbs, J. C. et ZHU, W. Strength of hardened self compacting concrete. In : *Self-compacting concrete* (Stockholm, 13-14 September 1999). 1999. p. 199-209.

Gram H.E. and Piiparinen P. “Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance” Proceeding of First International RILEM

Hasni L., Bétons Autoplaçants : Synthèse Bibliographique, Rapport de Recherche N° 98- 004 /98-006, CEBTP, présenté aux journées du PN BAP, 1999

Hendi Ali, MOSTOFINEJAD, Davood, SEDAGHATDOOST, Arash, et al. Mix design of the green self-consolidating concrete : Incorporating the waste glass powder. Construction and Building Materials, 2019, vol. 199, p. 369-384

HOU, Wei-Ming, CHANG, Ping-Kun, et HWANG, Chao-Lung. A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag. Cement and Concrete Research, 2004, vol. 34, no 4, p. 615-622.

Jani, Yahya et Hogland, William. Waste glass in the production of cement and concrete—A review. Journal of environmental chemical engineering, 2014, vol. 2, no 3, p. 1767-1775. Karamberi A. et Moutsatsou, A. Participation of coloured glass cullet in cementitious materials. Cement and Concrete Composites, 2005, vol. 27, no 2, p. 319-327.

Kennedy , Charles T. The design of concrete mixes. In : Journal Proceedings. 1940. p. 373-400.

Khayat, (1999). Workability , Testing , and Performance of Self-Consolidating Concrete. ACI Materials Journal, 96(3), 346-354.

KHAYAT, GHEZAL et HADRICHE, M. S. Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete. Materials and structures, 2000, vol. 33, p. 338-344

Ladayciya Haifa et RIGHI, Yanis. Etude de la durabilité des bétons à base de poudre de verre. 2020, Mémoire de Fin d'étude , Ecole Nationale Polytechnique

LEGHREIB, Mekki Nour El Islam. Durabilité des bétons à la poudre de verre : étude de la carbonatation. 2015. Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique

LU, Jian-xin, DUAN, Zhen-hua, et POON, Chi Sun. Combined use of waste glass powder and cullet in architectural mortar. Cement and Concrete Composites, 2017, vol. 82, p. 34-44.

MEYER, C. et BAXTER, S. Use of recycled glass for concrete masonry blocks. Final report. Columbia Univ., Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, New York, United States 1997

Neville A.M., Propriétés des bétons, Traduction de CRIB, Sherbrooke, Canada, Ed. Eyrolles, Paris, 2000

NF EN 12350-10, Novembre 2010, «Essai pour béton frais – partie 10, béton autoplaçant– Essai à la boîte en L», Afnor.

NF EN 12350-11, Novembre 2010, «Essai pour béton frais – partie 11, béton autoplaçant– Essai de stabilité au tamis», Afnor

NF EN 12350-8, Novembre 2010, «Essai pour béton frais – partie 8, béton autoplaçant– Essai d'étalement au cône d'Abrams», Afnor. Suite de la correction du code LaTeX :

“latex NF EN 12350-8, Novembre 2010, «Essai pour béton frais – partie 8, béton autoplaçant–Essai de V Funnel », Afnor.

Okamura, Hajime et OUCHI, Mashaor. Self-compacting concrete–Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 1. 2003.

Özkan Ömer et YÜKSEL, İsa. Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products. Construction and Building Materials, 2008, vol. 22, no 6, p. 1288-1298.

Persson B., Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete, Proceedings of First International RILEM

Pineaud, A. Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants et application à l'industrie de la préfabrication. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2007, p. 271.

Pons et al. Creep and shrinkage of self-compacting concrete : a different behaviour compared with vibrated concrete ?. In : International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. RILEM Publications SARL, 2003. p. 645-654.

Projet national de recherche CERIB, « béton autoplaçant BAP », France, Octobre 2001 .

Proust E., Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés, Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002, p. 230.

Ramachandran V.S., Malhorta V.M., Jolicoeur C. et Spiratos N. « Superplasticizers : Properties and applications in concrete » Materials Technology Laboratory, CANMET, Canada 1998

Rebouh, Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants, projet de fin d'étude ENP, 2006.

Roy, Rahul et KUMAR, Pratyush. Study and experiment analysis of the feasibility of partial replacement of industrial waste glass powder as cement in self compacting concrete. International Journal of Civil Engineering Technology (IJCIET), 2017, p. 1-9.

Saribiyik, Mehmet, PISKIN, Abdullah, et SARIBIYIK, Ali. The effects of waste glass powder usage on polymer concrete properties. Construction and building materials, 2013, vol. 47, p. 840-844.

Schwarz et al. Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes. Cement and Concrete Composites, 656-666.

Sedran, Thierry. Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants." 1999. Thèse de doctorat. Marne-la-vallée, ENPC.

Shao et al. Studies on concrete containing ground waste glass." Cement and Concrete Research, 2000, vol. 30, no 1, p. 91-100.

Shiet al. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders." Cement and Concrete Research, 2005, vol. 35, no 5, p. 987-993

SHAYAN, Ahmad et XU, Aimin. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete : A field trial on concrete slabs. Cement and concrete research, 2006, vol. 36, no 3, p. 457-468.

Sonebi, Khayat. Effect of water velocity on performance of underwater, self-consolidating concrete. *Materials Journal*, 1999, vol. 96, no 5, p. 519-528. Soroushian et al. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 29, p. 368-377..

Topcu et al. Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, 2004, vol. 34, no 2, p. 267-274.

Turcry, P. Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation. Thèse doctorale, Université de Nantes, 2004

Vanjare et al, "Experimental investigation on self compacting concrete using glass powder." *International Journal of Engineering*.

Yahia Ammar et al., "Nouvelle approche sur la méthode du mortier de béton équivalent pour les bétons autoplaçants : modélisation expérimentale et analytique des propriétés rhéologiques des bétons autoplaçants", 2018, vol. 1, p. 63.

Zeroub et al . Microstructure and permeability of concrete with glass powder addition conserved in the sulphatic environment. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 219-237

Zidol Ablam. Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. 2009. Thèse de maîtrise, Université de Sherbrooke.