

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI DE LAGHOUCAT



Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Option : Matériau de Construction

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master

THEME

**Effet des additions cimentaires sur le comportement
rhéologique et mécanique des mortiers autoplaçants**

Présenté Par :

HADJADJ Miloud

CHENAFI Missoum

Mémoire présenté devant le jury composé de :

Mr. GOUAL Idriss	MCA	Président
Mr. FERHAT Ahmida	MAA	Examineur
Mr. BELAIDI Akram Salah Eddine	MCA	Encadreur
Mr. BOUKHELKHAL Aboubakeur	MAA	Co-Encadreur

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier en premier lieu DIEU miséricordieux qui nous a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail. Nous tenons à remercier le président de jury Dr. Goual Idriss et l'examineur Mr. Ferhat Ahmida qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre mémoire. Nous tenons à remercier l'encadreur Dr. Belaidi Akrem Salah Eddine et le co-encadreur Mr. Aboubakeur Boukhelkhal, qui nous a guidé Pendant la réalisation de ce modeste travail .Nous tenons aussi à le remercier de nous avoir suivi, aidé, dirigé et aiguillé tous au long de notre projet. Nous remercions tous les responsables de LABORATOIRE de génie civil dans l'université de Amar Telidji Laghouat. Un spécial remerciement à tous les enseignants du département de Génie Civil qui ont contribué à notre formation.

DEDICATION

I would like to dedicate this simple, finished work to all my beloved ones.

I offer with deep love from the bottom of my heart this next words to the closest people to my life:

- To mine and only, my beloved mother who I sincerely love and appreciate all the pain and patient to raise me and made me the man that I am now, Thank you mom.
- To my father, the one who was responsible of raising me well, the one who without his precious advices I wouldn't stand by my own in this life, to you my dad thank you.
- To my grandmother from my father, the person that made me be as much happy as any child until growing up to the man that I am now, the only person responsible for finishing my studies with success, to you my grandmother thank you.
- To my brothers Ahmed, Oussama and the little one Abdrahman, to my two sisters, the next to be doctor messaouda and the little one lina.
- To the other persons in my family, my sister in law and my 2nd mother.
- To the little babies in our family, the daughters of my big brother Fatna and djoumana.
- To the only special person in my life, someone who is in this days an unknown to all the people besides myself, but soon to be known to all, to you N.B.
- To my neighbors, my contact, my closet people in my hometown.
- To my best friends from my class and university in general.
- To everyone who made me stand at this moment and write this words, far or close, young or adult, to you all thank you.

MILOUD.

DEDICACE

A ceux qui se sont toujours dévoués et sacrifiés pour moi ; ceux qui m'ont encouragé et soutenu à combattre les aléas de la vie et donner le meilleur de moi; en témoignage de mon éternelle reconnaissance je dédie essentiellement cette

mémoire à

Mes parents

Je dédie ce travail

A mes frères et ma Sœur

A tous les oncles et tantes

A mes adorables amis qui sont ma deuxième famille.

Missoum.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de poudre de marbre (PM), métakaolin (MK) et déchet de brique (DB) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers autoplçants (MAP). Pour ce travail, quatorze compositions ont été préparées avec un rapport E/L=0,4, et un dosage en superplastifiant varié entre 1.2 à 1.3%. La composition de référence contient uniquement le ciment Portland artificiel comme liant, alors que pour les mortiers binaires leurs compositions comportent de métakaolin (5, 10 et 15%) ou de la poudre de marbre (5, 15 et 25%) déchet de brique (5, 15 et 25%). pour les mortiers ternaires la substitution ce fait selon deux systèmes (10 , 15%MK + 15% PM), (15 , 25%DB + 15% PM). Les propriétés des MAP à l'état frais ont été testées à travers les essais suivants : étalement au mini cône, entonnoir en V, et mesures rhéologiques. A l'état durci les propriétés suivant ont été mesurée résistance à la compression, la vitesse de propagation d'onde et l'absorption d'eau par immersion. D'après les résultats obtenus, On remarque que l'ajout de poudre de marbre et déchet de brique cause une diminution des propriétés rhéologiques (τ_0 , μ), cependant l'addition du métakaolin entraine une augmentation de ces paramètres. A l'état durci, l'incorporation de métakaolin dans les mortiers autoplçants conduit à une augmentation des résistances mécaniques.

Mots clés : mortier autoplçant, addition, rhéologie, résistance, absorption.

المخلص

ان الهدف من هذه الدراسة هو دراسة تأثير مسحوق الرخام وميتاكاولين ومخلفات الطين المسحوقة على الخواص الريولوجية والميكانيكية لمونة ذاتية التسوية. في هذا العمل، تم اعداد اربعة عشرة تركيبة أعدت بنسبة $E/L = 0.4$ ونسبة من الملدن 1.2%. تحتوي التركيبة المرجعية فقط على الاسمنت بورتلاند الاصطناعي كرابط هيدروليكي، في حين المونة ثنائية الرابط المكونة إما من ميتاكاولين (5، 10، و15%) أو مسحوق الرخام بنسب مختلفة (5، 15 و25%). او من مخلفات الطين المسحوقة (5، 15 و25%). أما بالنسبة للمونة ثلاثية الروابط متكونة حسب نظامين من 15%PM + 25%DB + 15%MK و 15%PM ان الخصائص المونة ذاتية التسوية في الحالة المرنة تمت دراستها باستعمال التجارب التالية: تجربة امتداد بواسطة مخروط صغير، اختبار قمع على شكل حرف V، والقياسات الريولوجية. في حالة تصلب، تمت دراسة الخواص الميكانيكية مثل القوة الميكانيكية (اجهاد الضغط)، وامتصاص المياه بالغمر و الامواج فوق الصوتية .

من نتائج، لاحظنا أن المونة ذاتية التسوية المكونة من اسمنت ثنائية الرابط المكون أساسا من غبار الرخام ومخلفات الطين المسحوقة يؤثر إيجابيا على الخصائص الريولوجية. عكس من ذلك المونة ذاتية التسوية المكونة من اسمنت ثنائية الرابط المكون أساسا من ميتاكاولين تؤثر سلبا على الخصائص الريولوجية. في حالة التصلب، إدراج ميتاكاولين في الاسمنت يؤدي إلى زيادة اجهاد الضغط.

كلمات مفتاحية: مونة ذاتية التسوية، اضافات، الريولوجيا، اجهاد الضغط، إمتصاص.

Abstract

The objective of this study is to investigate the influence of marble powder, metakaolin and brick powder on the rheological and mechanical properties of self-compacting mortar. For this work, fourteen mixtures were prepared with W/L=0.4 ratio and a dosage of superplasticizer of 1.2%. The reference mixture contains only the artificial Portland cement as a binder, while for binary mortars their compositions contained the metakaolin (5, 10 and 15%) , marble powder (5, 15 and 25%) and brick powder (5, 15 and 25%). for ternary mortars substitution thus in two systems (10, 15% MK + 15% MP) and (15, 25% BP + 15% MP). The properties of MAP in the fresh state were tested through the following tests: spreading mini cone, V-funnel test, and rheological measurements. In the hardened state, the mechanical properties such as the mechanical strength (compressive strength), the ultrasound and water absorption with immersion were also tested. From the results, we note that for self-compacting mortars based binary cements composed of marble powder and brick powder positively influences the rheological properties. Against by metakaolin affects negatively mortars based binary cements. In the hardened state, the incorporation of metakaolin in the self-compacting mortar leads to increased strength.

Keywords: self-compacting mortar, addition, rheology, strength, absorption.

TABLE DES MATIÈRES

<u>REMERCIEMENT</u>	II
<u>DEDICATION</u>	III
<u>DEDICACE</u>	IV
<u>Résumé</u>	2
<u>المخلص</u>	3
<u>Abstract</u>	4
<u>LISTE DES FIGURES</u>	8
<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	10
Introduction générale.....	I
Chapitre I. Concepts et généralités sur le béton autoplaçant.....	3
I.1 Généralité sur le BAP :.....	3
I.2 Constituants de BAP :.....	3
I.2.1 Liants et Granulats :.....	3
I.2.2 Adjuvants des Bétons :.....	4
I.3 Caractéristiques de BAP :.....	7
I.3.1 Déformabilité:.....	7
I.3.2 Capacité de passage :.....	8
I.3.3 Résistance à la ségrégation :.....	9
I.4 Formulation de BAP :.....	9
I.4.1 Optimisation des Mortiers :.....	10
I.4.2 Optimisation du Volume de Pâte:.....	10
I.4.3 Optimisation du Squelette Granulaire :.....	10
I.5 La rhéologie:.....	11
I.5.1 L'importance de la rhéologie :.....	11
I.5.2 Les propriétés rhéologique :.....	12
I.5.3 Les modèles rhéologiques :.....	13
I.6 Conclusion :.....	15
Chapitre II. Les additions minérales et leur effet sur le béton.....	16
II.1 Introduction :.....	16
II.2 Les différentes additions minérales et leur effet sur le BAP :.....	16
II.2.1 Les additions de type I :.....	16
II.2.2 Les additions de type II :.....	18
II.3 Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires :.....	21
II.3.1 Effet de la densité de l'addition :.....	21
II.3.2 Effet de la morphologie :.....	22
II.3.3 Effet de la surface spécifique :.....	23
II.3.4 Effet de la distribution granulaire:.....	24
II.4 Effet des additions minérales sur la rhéologie:.....	25
II.4.1 Effet du type de l'addition:.....	25

II.4.2 Effet du taux de substitution:.....	26
II.4.3 Effet combines superplastifiant-additions minérales:	28
II.5 Bénéfices de l'utilisation des additions minérales :	29
II.5.1 Bénéfices fonctionnels :	29
II.5.2 Bénéfices économiques :	29
II.5.3 Bénéfices écologiques et environnementaux :	30
II.6 Conclusion :	30
Chapitre III. Matériaux, formulation et essais expérimentaux	31
III.1 Introduction :	31
III.2 Caractérisation des matériaux :	31
III.2.1 Sable :	31
III.2.2 Ciment :	34
III.2.3 Additions :	37
III.2.4 Superplastifiant :	38
III.2.5 Eau de gâchage :	39
III.3 Formulation du mortier autoplaçant :	39
III.3.1 Rapport Eau/Liant (E/L) :	39
III.3. 2Rapport Sable/Mortier (S/M) :	40
III.3.3 Variation du rapport Superplastifiat /Liant (Sp/L) :	40
III.3.4 Remplacement du ciment par les additions :	40
III.4 Essais expérimental :	41
III.4.1 Essai d'étalement au mini cône :	41
III.4.2 Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel) :	42
III.4.3 Essai au rhéomètre :	42
III.4.4 Confection et conservation des éprouvettes :	46
III.4.5 Résistance à la compression « Rc » :	46
III.4.6 Test ultrasonique :	47
III.4.7 Essai d'absorption par immersion :	48
Conclusion :	49
Chapitre IV. Analyses et discussion des résultats	50
IV.1 Introduction :	50
IV.2 Essais effectués sur mortiers a l'état frais :	50
IV.2.1 Mortier de référence :	50
IV.2.2 Mortier de ciments binaires:	51
IV.2.3 Mortier de ciments ternaires:	63
IV.3 Essais effectués sur mortiers à l'état durci :	71
IV.3.1 Résistance à la compression :	72
IV.3.2 Vitesse de propagation d'ondes:	75
IV.3.3 Absorption d'eau par immersion :	80
Conclusion:	81

Conclusion générale	82
Recommandations	85
References bibliographiques.....	86
Annexe	96

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Effet du type de superplastifiant sur l'hydratation du ciment [2].....	5
Figure 2. Mécanisme d'action du superplastifiant à base de polycarboxilate (ACI) [4].....	6
Figure 3. Essai d'étalement	8
Figure 4. Essai de la boîte en L	8
Figure 5. Essai de la stabilité au tamis.....	9
Figure 6. Schéma de vitesse de cisaillement.....	12
Figure 7. Contributions de la phase solide et la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton	13
Figure 8. Courbes d'écoulement : (a) modèles de Newton et de Bingham, (b) modèle de Herschel-Bulkley	15
Figure 9. Filler calcaire	17
Figure 10. Déchets de marbre (Poudre de marbre).....	17
Figure 11. Laitier des hauts fourneaux.....	18
Figure 12. Pouzzolane naturelle.....	19
Figure 13. Fumée de silice.....	19
Figure 14. metakaolin	20
Figure 15. Déchet de brique.....	20
Figure 16. Variation du temps d'écoulement et de l'étalement en fonction du taux de substitution du ciment et du dosage en superplastifiant [35]	Error! Bookmark not defined.
Figure 17. Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes 1 et 2 dans une formulation de béton [37]	22
Figure 18. Évolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique de l'addition minérale [49].....	23
Figure 19. Besoin en eau des mortiers CEM II – additions non adjuvantes en fonction du dosage en additions minérales (CA (Calcite), CP (Calcite Précipitée), QZ (Quartz), SF (Fumée de Silice) [54].....	24
Figure 20. Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier [55].	25
Figure 21. Effets du type de l'addition minérale sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [51].	26
Figure 22. Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant [66].....	27
Figure 23. Influence de la surface spécifique du ciment sur le seuil de cisaillement [74]	29
Figure 24. Tamiseuse électrique	31
Figure 25. Analyse granulométrique du sable.....	32
Figure 26. Equivalent de sable à vue et au piston [41].	33
Figure 27. essai d'absorption de sable.	34
Figure 28. Ciment utilisé dans la confection des mortiers autoplaçants.	35
Figure 29. essai de la masse volumique absolue du ciment.	35
Figure 30. Les différentes additions	37
Figure 31. Superplastifiant ' MEDAFLOW30 '	38
Figure 32. Exécution et mesure d'étalement au mini-cône	42
Figure 33. Exécution et mesure d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel).....	42
Figure 34. Dispositif du rhéomètre utilisé.....	43
Figure 35. Profil de vitesse [77].....	44
Figure 36. Conservations d'éprouvettes	46
Figure 37. Dispositif pour l'essai de résistance à la compression	47
Figure 38. Appareil ultrason	48
Figure 39. Immersion totale des éprouvettes.....	49
Figure 40. Effet de dosage de poudre de marbre sur l'étalement.	52
Figure 41. Évolution du temps d'écoulement en fonction de la teneur en poudre de marbre.....	53
Figure 42. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement des mortiers autoplaçant binaire (OPC, 5PM, 15PM, 25PM).	53
Figure 43. Influence de la poudre de marbre sur la viscosité des mortiers autoplaçant	54
Figure 44. Effet de taux de substitution par la poudre de marbre sur le seuil de cisaillement.	54
Figure 45. Effet de dosage de déchet de brique sur l'étalement.	56
Figure 46. Évolution du temps d'écoulement en fonction de la teneur en déchet de brique	57
Figure 47. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier autoplaçant binaire (OPC, 5DB, 15DB, 25DB).	57

Figure 48. Influence de déchet de brique sur la viscosité des mortiers autoplaçant.	58
Figure 49. Influence de déchet de brique sur le seuil de cisaillement des mortiers autoplaçant.	59
Figure 50. Effet de metakaolin sur l'étalement des mortiers autoplaçant.	60
Figure 51. Variation de temps d'écoulement en fonction de la teneur en metakaolin	61
Figure 52. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier autoplaçant binaire (OPC, 5MK, 10MK, 15MK)	61
Figure 53. Influence de metakaolin sur la viscosité des mortiers autoplaçant.	62
Figure 54. Influence de metakaolin sur le seuil de cisaillement des mortiers autoplaçant.	62
Figure 55. Effet de la combinaison de poudre de marbre avec le metakaolin sur l'étalement.	64
Figure 56. Effet de la combinaison poudre de marbre avec metakaolin sur le temps d'écoulement.	65
Figure 57. Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement du mortier autoplaçant ternaire (OPC, 15PM10MK et 15PM15MK).	66
Figure 58. Évolution de la viscosité des mortiers ternaires base à la combinaison de poudre de marbre avec le metakaolin	67
Figure 59. Evolution de seuil de cisaillement des mortiers ternaires base à la combinaison de poudre de marbre avec le metakaolin	67
Figure 60. Effet de la combinaison poudre de marbre avec déchet de brique sur l'étalement.	68
Figure 61. Effet de la combinaison poudre de marbre avec déchet de brique sur le temps d'écoulement.	69
Figure 62. Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement du mortier autoplaçant ternaire (OPC, 15PM15DB et 15PM25DB)	70
Figure 63. Évolution de la viscosité des mortiers ternaires base à la combinaison de poudre de marbre avec déchet de brique.	70
Figure 64. Evolution de seuil de cisaillement des mortiers ternaires base à la combinaison de poudre de marbre avec le déchet de brique.	71
Figure 65. Evolution de résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant la poudre de marbre	72
Figure 66. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant déchet de brique.	73
Figure 67. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant le metakaolin.	74
Figure 68. Effet de la combinaison 15PM15DB, 15PM25DB, 15PM10MK et 15PM15MK sur la résistance à la compression.	75
Figure 69. Évolution des vitesses de propagation d'ondes avec l'âge des mélanges à base de poudre de marbre.	76
Figure 70. Évolution des vitesses de propagation d'ondes avec l'âge des mélanges à base de metakaolin.	77
Figure 71. Évolution des vitesses de propagation d'ondes avec l'âge des mélanges à base de déchet de brique.	78
Figure 72. Évolution des vitesses de propagation d'ondes avec l'âge des mélanges ternaire de poudre de marbre avec déchet de brique.	79
Figure 73. Évolution des vitesses de propagation d'ondes avec l'âge des mélanges ternaire de poudre de marbre avec metakaolin.	80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques des additions minérales [89]	21
Tableau 2. Propriétés du béton autoplaçants en présence des fillers calcaires [67].....	27
Tableau 3. Caractérisation des bétons d'étude à l'état frais. [71].	28
Tableau 4. Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.	36
Tableau 5. Propriétés physico-chimiques des additions minérales	38
Tableau 6. Différentes formulations utilisées.	41
Tableau 7. Résultats de mortier autoplaçant de référence	50
Tableau 8. Composition des mélanges et résultats expérimentaux (poudre de marbre)	51
Tableau 9. Résultats de mortier autoplaçant binaire de déchet de brique	55
Tableau 10. Résultats de mortier autoplaçant binaire de metakaolin.....	59
Tableau 11. Résultats de mortier autoplaçant ternaire de metakaolin avec poudre de marbre	63
Tableau 12. Résultats de mortier autoplaçant ternaire de poudre de marbre avec déchet de brique	68
Tableau 13. Coefficient d'absorption de différents mélanges binaires	80
Tableau 14. Coefficient d'absorption de différents mélanges ternaires.....	81

Introduction générale

Depuis l'invention du béton, il est de loin le meilleur matériau de construction du monde, mais avec le temps il a commencé à avoir des problèmes. Ainsi certains chercheurs ont commencé à étudier et à chercher des solutions à ces problèmes, ils ont commencé à développer la structure du béton et de surveiller la durabilité et la compacité, cette dernière définit comme l'un des problèmes majeurs du béton qui conduit à créer certains espaces (des vides) dans la structure de béton, c'est pourquoi les ingénieurs développent ce que l'on appelle le " Béton Autoplaçant " ou " BAP ". Les premiers prototypes du "BAP" ont été créés en 1988 par le professeur Okamura de l'université de Kochi à Tokyo, il est très fluide, très déformable, homogène et stable. Ils se mettent en place par l'unique effet de la gravité, sans l'utilisation de moyen de vibration et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes. L'utilisation de " BAP ", ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieur pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. Ce grand saut dans la technologie du béton a commencé à attirer l'attention et a obtenu viral dans le monde entier.

La qualité du BAP est fortement liée à la qualité du mortier autoplaçant (MAP). En effet, un MAP qui est bien formulé peut résulter d'un très bon BAP. La différence notable entre le MAP et un mortier ordinaire est dans la composition du mélange, notamment dans la quantité de ciment utilisé, le MAP contient un pourcentage plus élevé de ciment. En effet, cette grande quantité peut influencer négativement sur la durabilité du béton et l'environnement, parce que la production de ciment cause une émission de CO₂ dans l'atmosphère. C'est pourquoi les chercheurs ont essayé de se substituer le ciment par des autres co-produits et déchets industriels pour minimiser la pollution de l'environnement et augmenter la durée de vie de béton. C'est ce qui a aidé à la production d'un béton à faible impact sur l'environnement ou bien un Eco-béton, donc on peut assurer un bon développement durable.

Dans ce mémoire, on a utilisé un mortier autoplaçant avec une substitution de ciment par 3 types des additions minérales (déchet de brique, metakaolin et poudre de marbre) avec des dosages appropriés.

Pour chacune des compositions de mortiers, nous étudierons l'influence du pourcentage des additions sur le comportement rhéologique et mécanique des mortiers autoplaçants qui est contrôlée par des essais destructifs (résistance en compression) et des essais non destructifs (les essais rhéologiques).

Chapitre I. Concepts et généralités sur le béton autoplaçant

1.1 Généralité sur le BAP :

Le béton est de loin l'une des meilleures, sinon la meilleure invention dans le domaine de bâtiment et de génie civil. Son importance vient de sa grande résistance, sa simple mise en place à l'état frais, son long durée de vie (durabilité), et son faible coût. Il présente d'autres avantages intéressants comme une excellente tenue au feu, une grande résistance aux chocs, une bonne protection contre les radiations nucléaires, etc... Après tout, la science du béton est toujours dans le développement pour évoluer un béton plus efficace et plus résistant.

Après avoir inventé le béton, certains problèmes commencent à apparaître, ces problèmes laissez-nous créer un nouveau type de béton. Les bétons autoplaçants (BAP) ont été développés au Japon à la fin des années 80. Leur origine semble provenir de la nécessité d'utiliser des matériaux de plus en plus « performants » pour palier une réduction de la qualité des constructions due à une mauvaise mise en place du matériau [1]. La mise en œuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir-faire particulier.

La solution proposée a été d'utiliser un matériau très fluide, capable de se compacter sous son poids propre, sans vibration extérieure. Ces matériaux initialement appelés Bétons Hautes performances, sont aujourd'hui connus sous le nom de bétons autoplaçants, bétons autocompactants, ou bétons autonivellants, selon les applications [1]. Ils connaissent à l'heure actuelle un essor considérable en Europe et aux Etats-Unis et prendront dans les années à venir une place de plus en plus importante. Les domaines d'application des BAP sont nombreux, mais leur utilisation implique une évolution ou une adaptation des moyens et des techniques traditionnellement employées.

1.2 Constituants de BAP :

1.2.1 Liants et Granulats :

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments. Cependant, compte tenu des exigences de démoulage aux jeunes âges, les BAP utilisés dans l'industrie du béton contiennent presque toujours du ciment CPA-CEM I 42.5.

Le liant est constitué de ciment auquel on ajoute des particules fines minérales qui correspondent à des additions normalisées ou non, ce sont principalement :

- Des fillers calcaires (calcite, dolomite,....).
- Des fillers siliceux, des laitiers de haut fourneau.
- Des cendres volantes.
- Des fumées de silice.
- Déchet de brique.
- Métakaolin.

Dans les BAP, la proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire afin de permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées. Le rapport massique G/S est de l'ordre de 1. Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés et concassés. Néanmoins, comme dans le cas des bétons traditionnels, la forme des granulats a une influence sur la rhéologie des BAP. Les coefficients de frottements sont plus faibles entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés.

1.2.2 Adjuvants des Bétons :

De nos jours le béton incorpore dans sa matrice non seulement des ajouts cimentaires mais aussi des adjuvants chimiques qui améliorent ses propriétés à l'état frais et durcis. L'usage de ces nouvelles matières a besoin d'être bien contrôlé, parce que toutes les combinaisons ne sont pas toujours compatibles et bénéfiques pour les propriétés du béton, quelques-uns de ces produits réagissent les uns avec les autres, avec des phases du ciment ou les produits d'hydratation.

L'utilisation des superplastifiants en combinaison avec les ajouts cimentaires ont ouvert plusieurs voies technologiques intéressantes tels que : les bétons à hautes performances, les bétons autoplaçants et les bétons à poudres réactives. Les agents réducteurs d'eau ordinaire telle que les lignosulfonates sont utilisés dans des bétons ayant un rapport eau-ciment de 0,40 ou plus haut. Quand une réduction d'eau plus élevée est exigée, l'usage de superplastifiants est approprié. Les polymères synthétiques sont les plus effectifs pour ce but. Les produits à base de polynaphtalène sulfonates et de polyméla mine sulfonates sont les plus utilisés depuis plusieurs années. Ils peuvent accomplir jusqu'à 30% de réduction d'eau.

Une nouvelle génération de superplastifiants à base de polyacrylates a été développée récemment et peut accomplir la même réduction de l'eau que les superplastifiants antérieurs pour un dosage qui est beaucoup plus inférieur. Quelques ajustements sont faits pour diminuer les effets secondaires de ces produits; Tel que l'entraînement excessif d'air ou un retard excessif de la prise du ciment.

La Figure 1 illustre l'effet des deux familles de superplastifiants sur l'hydratation des pâtes de ciment. Le retard de l'hydratation du ciment est aussi présenté à la même figure.

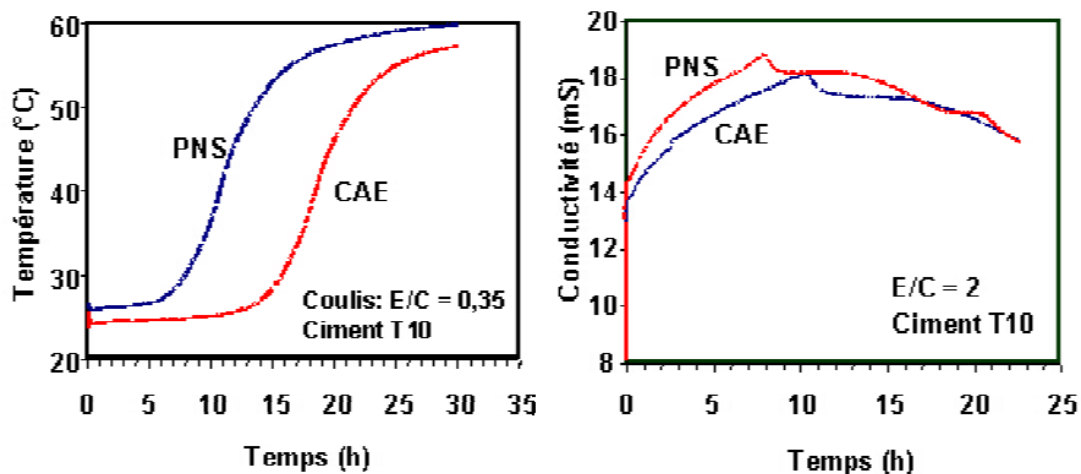


Figure 1. Effet du type de superplastifiant sur l'hydratation du ciment [2]

a. Superplastifiant :

Pour ajuster la fluidité d'un BAP en fonction des contraintes de mise en place et des résistances mécaniques désirées, il est nécessaire d'utiliser un superplastifiant.

Les superplastifiants, ont un double effet, électrique et stérique qui leur permet de disperser au mieux les particules. Car ils interagissent avec les particules de ciment et éventuellement avec les additions en s'adsorbant à leur surface ce qui permet d'éviter le phénomène de floculation au contact de l'eau. Les particules sont ainsi dispersées par combinaison d'effet électrostatique et stérique et la proportion d'eau libre est plus importante. Pour une composition granulaire donnée, la capacité de remplissage d'un BAP dépend fortement du dosage en superplastifiant. Elle croit avec le dosage en superplastifiant jusqu'à un maximum au-delà duquel apparaissent les phénomènes de ségrégation des constituants (TANGTERMSIRIKUL et coll. 1988) [3].

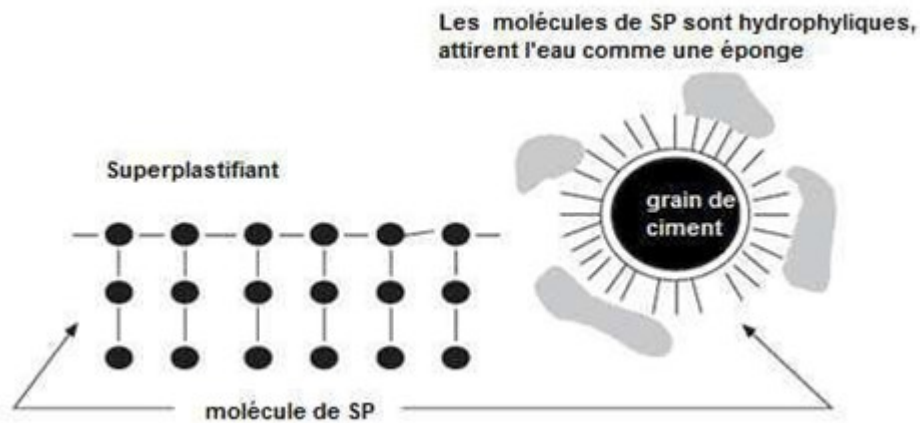


Figure 2. Mécanisme d'action du superplastifiant à base de polycarboxilate (ACI) [4]

Jusqu'à présent, il n'est pas encore possible de fabriquer des superplastifiants qui soient efficaces avec n'importe quel ciment, pour n'importe quel E/C, parce que la vitesse de dissolution des différentes formes de sulfates de calcium que l'on retrouve dans les ciments modernes varie beaucoup trop. Cependant, lorsqu'on fabrique un ciment portland, si on prend en considération l'influence du sulfate de calcium sur la rhéologie des bétons à faible rapport E/L, il est possible d'ajuster la composition du ciment portland pour qu'il devienne parfaitement compatible avec tous superplastifiants que l'on retrouve sur le marché [5].

b. Agent de viscosité :

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

Pour minimiser cet effet, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation. Les agents de viscosité peuvent être de différentes natures :

- Polysaccharide obtenu par fermentation microbiologique du type gomme welan ou gomme de xanthane.
- Dérivés cellulosiques à base de méthyle cellulose, d'hydroxy-éthyle cellulose.
- Colloïde naturel.
- Suspension des particules siliceuses.

L'agent de viscosité est un polymère qui interagit avec l'eau et rend la pâte du béton plus visqueuse. Une meilleure cohésion de la pâte permet de maintenir une distance entre les granulats, ce qui réduit leurs interactions de friction et de collision lors de l'écoulement du matériau et

évite le phénomène de blocage au droit d'un obstacle. Il permet de conserver une répartition homogène des différents constituants, l'action de l'agent de viscosité étant d'une certaine façon opposée à celle du superplastifiant, l'optimisation de la fluidité et de la résistance à la ségrégation d'un BAP requiert la sélection d'un couple compatible de superplastifiant et d'agent de viscosité et l'ajustement de leur dosage.

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage en agent de viscosité trop important empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité. Notons également qu'une très forte quantité d'agent de viscosité peut conduire à un entraînement d'air excessif. Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps, sur une durée de l'ordre d'une heure. Parmi les différents types d'agent de viscosité, ceux à base de polysaccharide et plus particulièrement la gomme welan semblent se différencier par la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse. Une solution de gomme welan présente un seuil de cisaillement élevé et une faible viscosité pour des contraintes de cisaillement élevées. De ce fait, un béton contenant de la gomme welan possède une forte déformabilité lorsqu'il s'écoule et celle-ci devient faible dès que le mouvement du matériau cesse.

1.3 Caractéristiques de BAP :

Un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais, qui sont reliées à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange en lui-même. Un des avantages des bétons autoplaçants est d'améliorer la déformabilité du mélange afin qu'ils puissent remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration (l'étalement du béton et sa mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité).

Les principaux paramètres qui caractérisent ces bétons sont la stabilité et la fluidité. Il existe de part le monde divers essais pour caractériser l'ouvrabilité des BAP.

1.3.1 Déformabilité:

. Essai d'Etalement :

C'est l'essai le plus courant, il s'effectue sur une plaque métallique plane de plus de 90 cm de côté et à l'aide du cône d'Abrams.

À l'essai au cône d'Abrams, le BAP, du fait de sa fluidité s'étale et forme une galette dont on mesure le diamètre, qui dépasse souvent les 500mm. La notion traditionnelle d'affaissement au cône d'Abrams n'a plus aucun sens avec ce genre de béton. Il donne une indication sur la capacité à s'auto-compacter en milieu non confiné, qui présenté dans la Figure 3.

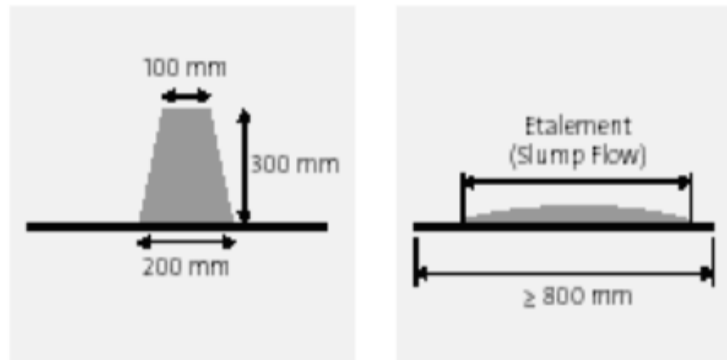


Figure 3. Essai d'étalement

1.3.2 Capacité de passage :

. Essai de la boîte en L :

On remplit la partie verticale du L de béton (Figure 4), et on mesure la différence de la hauteur dans les parties verticales et horizontales. Pour un BAP, cette dernière doit être la plus faible possible.

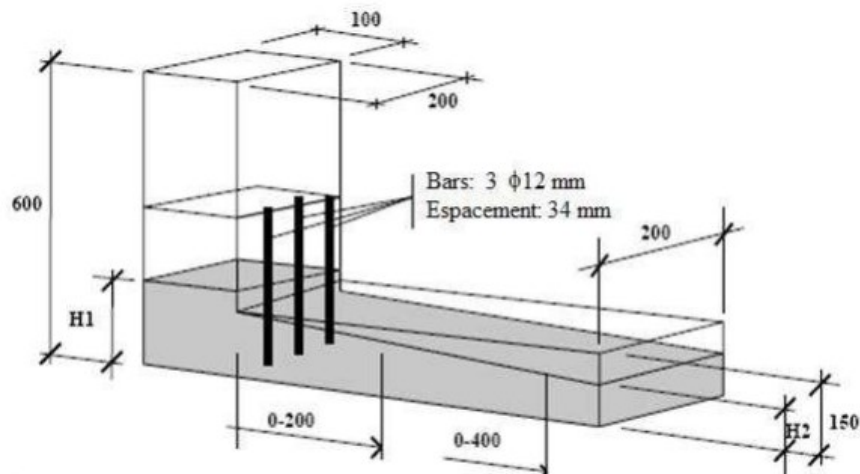


Figure 4. Essai de la boîte en L

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrillés. Pour des applications moins ferrillées, il est possible

d'alléger la grille de ferrailage en ne plaçant que deux barres avec un espace libre de 58 mm. En cas de blocage des gravillons, il convient de diminuer le volume la teneur en granulat d'une part, et d'augmenter le volume de pâte en maintenant le rapport Eau/Liant constant.

1.3.3 Résistance à la ségrégation :

. Essai de stabilité au tamis :

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

L'essai consiste à verser 10 litres de béton dans un sceau juste après le malaxage. Il faut couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation ; après 15 minutes, on verse au centre d'un tamis de 5 mm d'ouverture un poids de béton égal à $4.8 \text{ kg} \pm 0.2 \text{ kg}$, avec une hauteur de chute du béton de $50 \pm 5 \text{ cm}$; après 2 minutes, on calcule le poids de la laitance passée au tamis, ce qui nous permet de qualifier les BAP vis-à-vis des risques de ségrégation et de ressuage. (Figure 5)

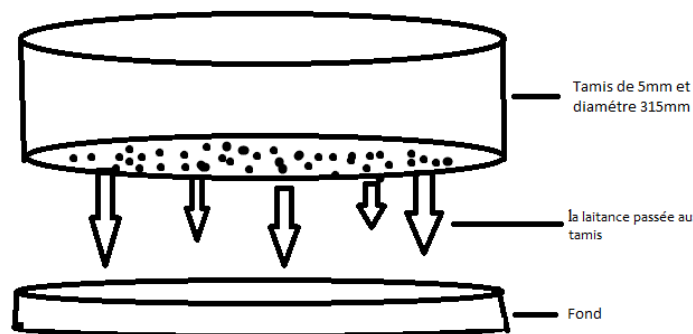


Figure 5. Essai de la stabilité au tamis

1.4 Formulation de BAP :

L'approche d'optimisation pour développer les performances d'un béton et sa durabilité consiste en général à choisir et examiner un groupe d'essais préliminaires, évaluer les résultats puis ajuster des propositions de mélange et examiner d'autres mélanges jusqu'à ce que les propriétés exigées soient réalisées.

Les betons autoplaçants se caractérisent par la diversité des matériaux cimentaires qu'ils contiennent, cette diversité doit être gérée par des techniques d'optimisations et de formulations assurant les meilleures propriétés de ces bétons. A cet effet, beaucoup de chercheurs se sont orientés vers l'optimisation et le développement des formulations des BAP, quelques résultats de ces recherches seront exposés dans cette partie.

1.4.1 Optimisation des Mortiers :

Selon OKAMURA [1], le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est fixée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé). La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité.

Tous les résultats dans notre travail ont fait avec cette méthode de formulation (**méthode Japonaise**).

1.4.2 Optimisation du Volume de Pâte:

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Son rôle est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. Cette formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

1.4.3 Optimisation du Squelette Granulaire :

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons [85]. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

SEDRAN et DE LARRARD [86] ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du

béton. ROSHAVELOV [87] a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique.

D'autres recherches ont été réalisées afin de déterminer les quantités et la taille optimales des gros granulats capables de donner un maximum d'ouvrabilité au béton. Ces études ont analysé l'impact de cette optimisation du béton à l'état frais sur les propriétés des bétons durcis

1.5 La rhéologie:

La rhéologie est l'étude de l'écoulement et de la déformation des matériaux sous des forces appliquées qui est mesurée de façon routinière à l'aide d'un rhéomètre. La mesure des propriétés rhéologiques est applicable à tous les matériaux - des fluides tels que les solutions diluées de polymères et tensioactifs aux formulations de protéines concentrées, aux semi-solides tels que les pâtes et les crèmes, aux polymères fondus ou solides ainsi que l'asphalte. Les propriétés rhéologiques peuvent être mesurées à partir d'une déformation d'échantillon en masse en utilisant un rhéomètre mécanique.

La rhéologie est un terme qui est principalement utilisé pour les fluides dont les propriétés d'écoulement sont compliqués dans la nature, autres que les fluides comme les liquides ou les gaz. Le terme rhéologie peut être défini comme l'étude de la science du flux et de la déformation des matériaux.

1.5.1 L'importance de la rhéologie :

Les propriétés du béton à l'état durci soient plus évoquées pour les bétons d'aujourd'hui, il s'avère que si un béton ne peut être mis en place correctement, ses propriétés désirées ne seront pas obtenues. Pour chaque application, les caractéristiques requises pour le béton frais sont différentes et définissent si un béton a de bonnes propriétés à l'état frais telles que les besoins de finition, de mise en place, de résistance à la ségrégation...etc. Aujourd'hui, le développement des nouveaux bétons intensifie le besoin de caractériser encore mieux le comportement du béton et son écoulement. De nombreux ajouts cimentaires et adjuvants organiques ont fait leur apparition et viennent apporter des modifications importantes au béton. L'importance de la maniabilité et de sa mesure ont pris du même coup une importance primordiale.

Auparavant, un béton plus fluide était automatiquement associé aux problèmes de ségrégation et une faible résistance à la compression. De nos jours, il est maintenant possible de produire un béton très fluide ayant d'excellentes propriétés mécaniques [7].

1.5.2 Les propriétés rhéologique :

a. Viscosité :

Caractéristique d'un matériau fluide tendant à s'opposer à son écoulement par gravité. Plus la viscosité d'un béton est faible, plus son ouvrabilité est bonne.

Au niveau moléculaire, la viscosité est le résultat de l'interaction entre les différentes molécules dans un fluide. Cela peut être également compris comme le frottement entre les molécules dans le fluide. Tout comme dans le cas du frottement entre les solides en mouvement, la viscosité déterminera l'énergie nécessaire pour faire un écoulement de fluide.

b. Contrainte de cisaillement :

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'apparition de contraintes τ [Pa], qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche [8]. Donc, on peut dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide :

$$dF/dS \tag{1}$$

Où :

dF : Projection de la force de frottement tangentielle.

dS : Surface élémentaire d'une couche cisailée.

c. Vitesse de cisaillement :

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles, emprisonné entre deux plans parallèles de surface S (séparés d'une distance dz). Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance dx à une vitesse constante de norme V_0 (Figure 6).

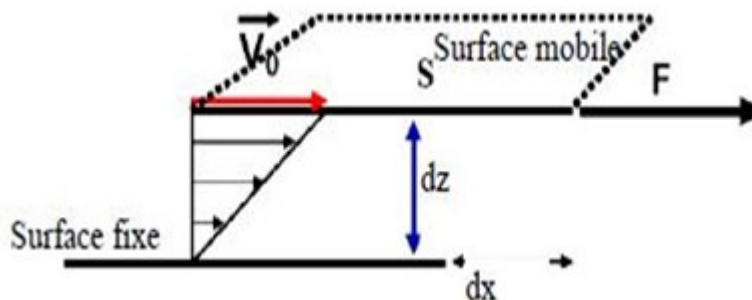


Figure 6. Schéma de vitesse de cisaillement

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse. Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Il se crée un gradient de vitesse entre les deux plans. Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole γ suivant la relation :

$$\gamma = dx/dz \quad (2)$$

La norme du gradient de vitesse constant dans tout l'échantillon est définie comme la vitesse de cisaillement, appelée également vitesse de déformation ou taux de cisaillement. Il s'agit de la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement. [8]

d. Seuil de cisaillement :

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimale à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous de cette valeur, cette mixture se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes). De Larrard et al. [9] ont considéré que le seuil de cisaillement τ_0 [Pa] est la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton y compris les grains de ciment et les particules ultrafines (Figure 7).

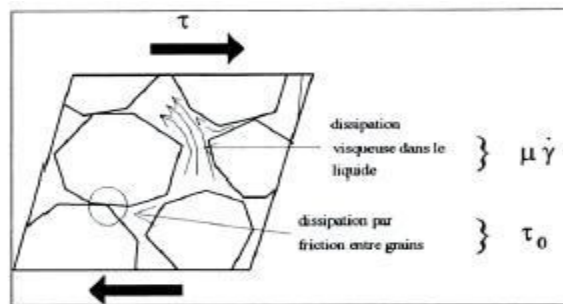


Figure 7. Contributions de la phase solide et la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton

1.5.3 Les modèles rhéologiques :

a. Modèle de Newton :

Plusieurs fluides tels que l'eau et l'huile sont classés comme des fluides Newtoniens où la contrainte de cisaillement est directement proportionnelle au taux de cisaillement (Figure 8.a). L'écoulement d'une telle matière est décrit par l'équation suivante [81] :

$$\tau = \eta \times \dot{\gamma} \quad (3)$$

Où :

τ : Contrainte de cisaillement en Pa

η : Viscosité en s^{-1}

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement en Pa.s

b. Modèle de Bingham :

Contrairement aux fluides Newtoniens, l'écoulement de certaines substances telles que la pâte du ciment, mortier et béton ne commence qu'après que la contrainte de cisaillement dépasse le seuil de cisaillement τ_0 , raison pour laquelle l'écoulement d'une telle matière est régi par le modèle Binghamien (Figure 8.a). Dans ce cas, deux paramètres sont nécessaires pour décrire l'écoulement, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique [81].

$$\tau = \tau_0 + \mu \times \dot{\gamma} \quad (4)$$

Où :

τ : Contrainte de cisaillement en Pa

τ_0 : Seuil de cisaillement en Pa

μ : Viscosité en s^{-1}

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement en Pa.s

c. Modèle de Herschel-Bulkley :

Certains fluides non Newtonien sont caractérisés par un écoulement non linéaire. Le modèle qui prend en considération le comportement de ces fluides est celui de Herschel-Bulkley (Figure 8.b). Dans ce cas, l'écoulement est défini par trois paramètres : le seuil de cisaillement τ_0 (Pa), la consistance k et l'indice d'écoulement n (constantes) [81].

$$\tau = \tau_0 + k \times \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

Où :

τ : Contrainte de cisaillement en Pa

τ_0 : Seuil de cisaillement en Pa

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement en Pa.s

k : Consistance

n : Indice d'écoulement

En fonction de la valeur de l'indice d'écoulement n , le fluide est supposé :

- Rhéoépaississant ou dilatant ($\mu \uparrow$) pour $n > 1$
- Binghamien pour $n = 1$
- Rhéofluidifiant ($\mu \downarrow$) pour $n < 1$

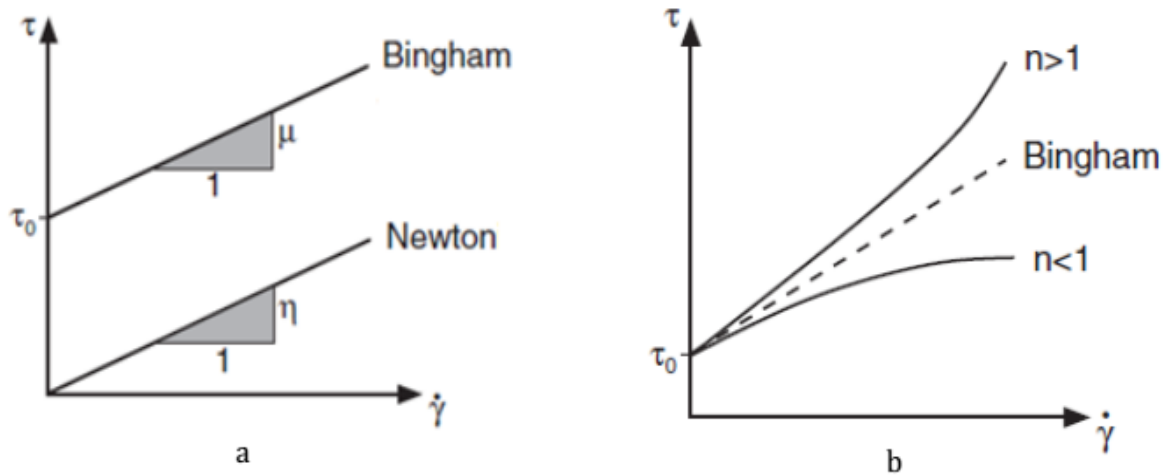


Figure 8. Courbes d'écoulement : (a) modèles de Newton et de Bingham, (b) modèle de Herschel-Bulkley

1.6 Conclusion :

Les bétons spéciaux comme le BAP, ont une grande importance dans la vie actuelle, il est impossible de confectionner ces bétons sans l'introduction des autres additions et adjuvants, qui améliorent certaines propriétés. Ces additions doivent être caractérisées et sélectionnées par des essais et optimiser par des formulations spécial pour apporter leurs rôle sur l'amélioration des propriétés rhéologiques, mécaniques ou de durabilité.

Chapitre II. Les additions minérales et leur effet sur le béton

II.1 Introduction :

L'industrie du ciment est une source importante d'émissions de gaz CO₂. Le ciment utilisé dans la conception du béton est le résultat d'un processus chimique lié à la décarbonatation du calcaire conduit à haute température et entraîne une libération significative de dioxyde de carbone. Donc les chercheurs de génie civil commençant de faire des mélanges de béton avec une faible quantité de ciment, en remplaçant le ciment par des additions minérales, par exemple, laitier haut fourneau, les cendres volantes ou les fillers calcaires. Le remplacement de ciment par ces additions conduit, généralement, à la réduction de la quantité d'eau nécessaire au gâchage et à l'augmentation consécutive de la compacité du matériau. Ainsi, des améliorations très significatives des performances mécaniques, physiques et de durabilité caractérisent ce nouveau béton. En effet, l'incorporation des additions minérales dans le squelette d'un mélange granulaire ne peut pas s'appuyer sur les méthodes classiques d'optimisation de l'empilement granulaire (Faury, Dreux-Gorisse, ...) utilisées pour la détermination des quantités des granulats nécessaires pour la formulation des bétons courants. La petite dimension des particules des additions les rend beaucoup plus sensibles aux forces inter-granulaires. Des phénomènes de floculation des particules peuvent apparaître ainsi que des interactions fortes avec les grains de ciment anhydres. L'efficacité de la dispersion des particules par les adjuvants fluidifiants n'est que partielle, elle dépend de la nature et de la quantité relative ciment-addition minérale employée dans la formulation. Le comportement rhéologique des mélanges avec additions minérales et adjuvants fluidifiants s'écarte sensiblement des modèles rhéologiques considérés pour les bétons courants.

II.2 Les différentes additions minérales et leur effet sur le BAP :

C'est des poudres d'origine minérale ajoutées au béton pour augmenter ou bien diminué certaines de ses propriétés. Selon la norme **ENV 206**, paragraphe 3.1.5, il existe deux types d'addition :

II.2.1 Les additions de type I :

Ce sont des additions finement broyées, ces additions n'ont pas une activité pouzzolanique. Ce sont des matériaux quasiment inertes, synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau). Parmi ces additions on distingue **[83]** :

a. Filler calcaire :

La poudre de calcaire ou filler calcaire est un déchet du concassage des roches calcaires. L'incorporation de cette addition dans les BAP conduit vers l'augmentation du seuil de cisaillement, alors qu'elle a un faible effet sur l'étalement et la viscosité plastique [16]. (Figure 9)



Photo 9. Filler calcaire

b. Poudre de marbre :

C'est un déchet résultant des opérations de sciage, façonnage et lustration de la roche de marbre [31]. Cette roche d'origine calcaire est caractérisée par sa beauté, sa diversité et son aspect lisse et brillant qui font d'elle l'une des roches les plus nobles qui puisse exister. Le marbre est utilisé pour des objets esthétiques aussi bien dans les maisons (revêtements muraux, des dallages, éléments sanitaires) (Photo 10).



Photo 10. Déchets de marbre (poudre de marbre)

II.2.2 Les additions de type II :

Ce sont des matériaux inorganiques finement broyés, pouzzolanique ou hydraulique latent. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium seul ou en dioxyde de silicium et dioxyde d'aluminium combinés. Parmi ces additions on distingue [83] :

a. Laitier des hauts fourneaux :

Est un sous-produit des usines sidérurgiques forme essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances. Ainsi sa taille ultrafine (entre 1 et 80 micromètres). Le remplacement de 20% du ciment par du laitier des hauts fourneaux peut donner un BAP homogène sans ressuage et sans ségrégation [27]. L'augmentation de teneur en laitier des hauts fourneaux mené à une diminution de la résistance à la compression [27]. (Photo 11)



photo 11. Laitier des hauts fourneaux, (1) avant broyage ; (2) après broyage.

b. Pouzzolane naturelle :

La pouzzolane naturelle est un matériau d'origine volcanique, disponible en abondance dans l'ouest de l'Algérie (beni-saf) [14]. Krachai et al [14] ont étudié l'influence de la pouzzolane naturelle de beni-Saf sur les performances mécaniques des BAP. La pouzzolane naturelle engendre une augmentation importante des résistances mécaniques après 28 jours (Figure 12).

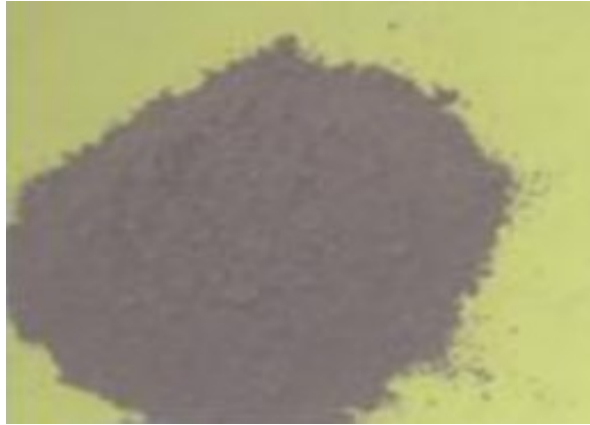


Photo 12. Pouzzolane naturelle.

c. Fumée de silice :

Est un déchet résultant de l'industrie de silicium métal et de ses alliages. Elle est caractérisée par sa grande activité pouzzolanique et son cout élevé, ainsi sa taille ultrafine (entre 0,01 et quelques micromètres) [15] (Photo 13).



Photo 13. Fumée de silice.

d. Metakaolin :

Le metakaolin est un type d'argile (kaolin) calcinée à 750°C [21]. Le kaolin se trouve dans certaines régions de l'est de l'Algérie (Jijel, Guelma). Le metakaolin est considéré comme une matière pouzzolanique en raison de sa surface spécifique élevée et de la silice amorphe qui entre dans la composition de cet aluminosilicate [22]. Le metakaolin engendre une augmentation de la résistance à la compression à 28 jours, de la demande en SP, de la viscosité plastique, du seuil de cisaillement respectivement de 22%, 27%, 180%, 240% et 320%. Selon de nombreuses recherches [25,26] (Photo 14).



Photo 14. Metakaolin.

e. Déchets de brique :

Les déchets de briques sont des sous-produits de l'industrie des briques rouges. Ils se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de déchets (briques non conformes où cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % que leurs productions [75]. Par ailleurs des études entreprises par S.WILD [76] ont montré ces déchets possèdent un caractère pouzzolanique (Photo 15).



Photo 15. Déchet de brique broyés

Tableau 1. Caractéristiques des additions minérales [89]

Addition	<i>Cendres volantes</i>	<i>L. haut four-neau</i>	<i>Microsilicee</i>	<i>Metakaolin</i>
Taille de particules (μm)	1-80	3-100	0.03-0.3	0.2-15
Surface spécifique (m^2/kg)	3.50	400	20000	12000
Densité relative	2.3	2.9	2.2	2.5
Forme des particules	Sphérique	Irrégulier	Sphérique	Irrégulier

II.3 Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires :

Il existe plusieurs mécanismes de l'action des additions minérales qui induisent des modifications dans la rhéologie de la pâte du ciment ou du béton. Les avantages de ces additions sont généralement attribués à la morphologie de la surface texturale, la distribution granulaire qui influent sur la rhéologie des matériaux cimentaires [32,33].

II.3.1 Effet de la densité de l'addition :

Lorsque le ciment est remplacé par une addition minérale de poids spécifique inférieure, il résulte un grand volume de pâte qui nécessite plus d'eau de gâchage pour recouvrir tous les grains. L'utilisation de la zéolite naturelle, ayant un poids spécifique de 2.2 g/cm^3 inférieur de celui du ciment (3.09 g/cm^3), diminue l'ouvrabilité du béton ce qui conduit à l'utilisation de superplastifiant pour maintenir une ouvrabilité constante. Ce besoin en superplastifiant ne suit pas une progression linéaire avec le taux de substitution tels que l'incorporation de 30% de zéolite naturelle nécessite trois fois la quantité de superplastifiant d'un béton contenant 15% de cette addition [34]. Similaires observations ont été aussi révélées par Şahmaran [35] et Ahmadi et Shekarchi [36] où cette addition peut être utilisée comme agent de viscosité pour les coulis de ciment.

II.3.2 Effet de la morphologie :

La morphologie des additions minérales à une grande influence sur le comportement rhéologique des matériaux cimentaires. Les résultats présentés sur la figure 17 montrent que la substitution d'une partie du ciment par des cendres volantes dans une formulation de béton conduit à la réduction progressive du dosage en eau pour une même consistance en raison du caractère sphérique non poreux des particules de cendres volantes [37]. Dans le même contexte, Lange et al. [38] ont conclu que pour une fluidité donnée, l'introduction d'une quantité spécifique de cendres volantes réduisait la quantité d'eau de gâchage et augmentait la fluidité du mélange. Ce comportement a été expliqué par la forme sphérique des particules qui facilitent l'empilement granulaire et réduisent les frictions inter-particulaires [39]. La forme sphérique réduit aussi le rapport de la surface par le volume des particules, ce qui engendre une demande en eau dans le mélange, plus réduite [40]. D'autre part, la combinaison de la fumée de silice avec le superplastifiant améliore l'ouvrabilité du béton et contribue à la dispersion des grains de ciment [41]. Buil et al. [42] montre que les fumées de silice de granulométrie plus étendue sont plus favorables au maintien de la maniabilité des bétons.

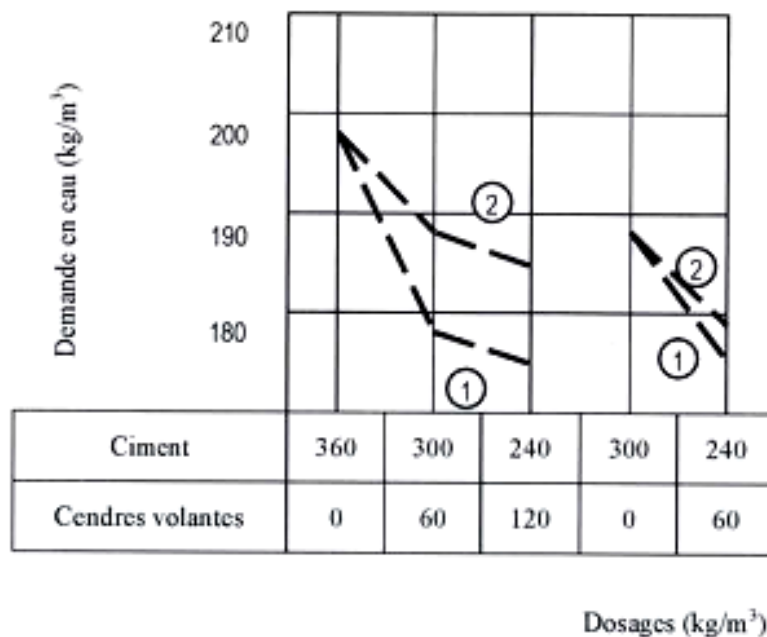


Figure 16. Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes 1 et 2 dans une formulation de béton [37]

II.3.3 Effet de la surface spécifique :

L'addition des ajouts minéraux au ciment Portland peut produire plusieurs modifications au sein du squelette solide du mélange. La petite taille des particules des ajouts comble les vides interstitiels et augmente la densité de la matière. Par conséquent, l'eau attrapée dans les pores granulaires est libérée ce qui augmente la compacité de la pâte, améliore l'ouvrabilité et diminue la demande en eau [43, 44,45]. Plusieurs recherches montrent que l'augmentation de la surface spécifique des fillers entraîne une altération des propriétés d'écoulement (à teneur en eau fixée) que ce soit à l'échelle de la pâte, du mortier [46,47] ou du béton [48]. La figure 18 montre une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité du BAP avec l'augmentation de la surface spécifique du filler [49]. Par contre, El Hilali [50] a remarqué que la finesse des fillers calcaires influe de manière significative sur la quantité d'eau nécessaire pour remplir les vides dans la pâte de ciment. Le même auteur a montré que la viscosité des mortiers autoplaçantes diminue légèrement avec l'augmentation de la finesse des additions calcaires, ce qui implique une réduction du seuil de cisaillement des mortiers de ciments.

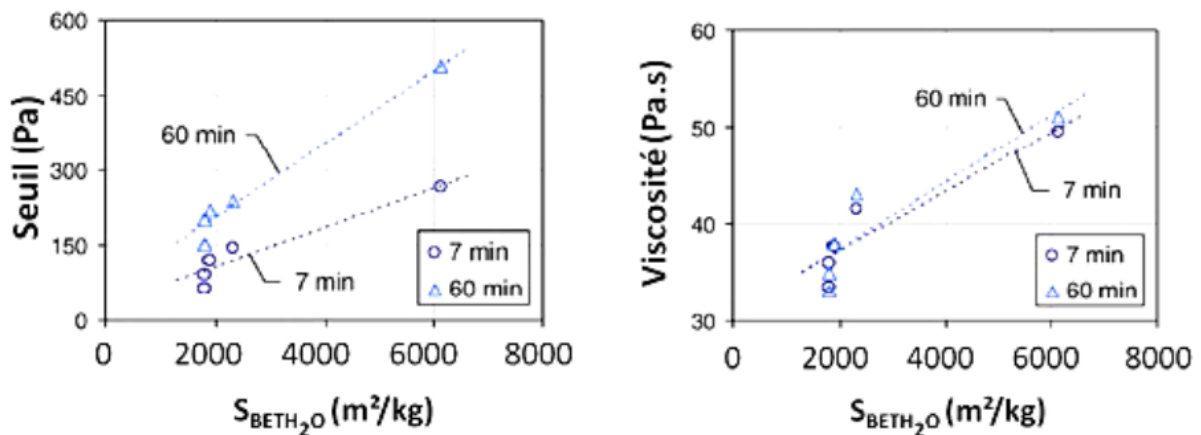


Figure 17. Évolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique de l'addition minérale [49].

Park et al. [51] ont observé une diminution de la viscosité plastique des pâtes contenant du laitier de hauts fourneaux de surface spécifique élevée (5962 cm²/g) par rapport à celle du ciment (3290 cm²/g). Cela a été expliqué par l'apparition de petites particules sphériques de laitier (taille moyenne 8,07 μ m) entre de grosses particules de ciment (taille moyenne 18,07 μ m). De même Atzeni et al. [52] et Wu et Roy [53] ont constaté que les paramètres rhéologiques, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique peuvent augmenter ou diminuer avec un additif de laitier, cela dépend de la relation entre la surface spécifique du ciment et du laitier.

En étudiant la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers, Bessa [54] trouvait que l'effet granulaire des additions minérales sur les formulations des mortiers non adjuvants dépend en premier lieu de la finesse et de la quantité de l'addition introduite (Figure 19).

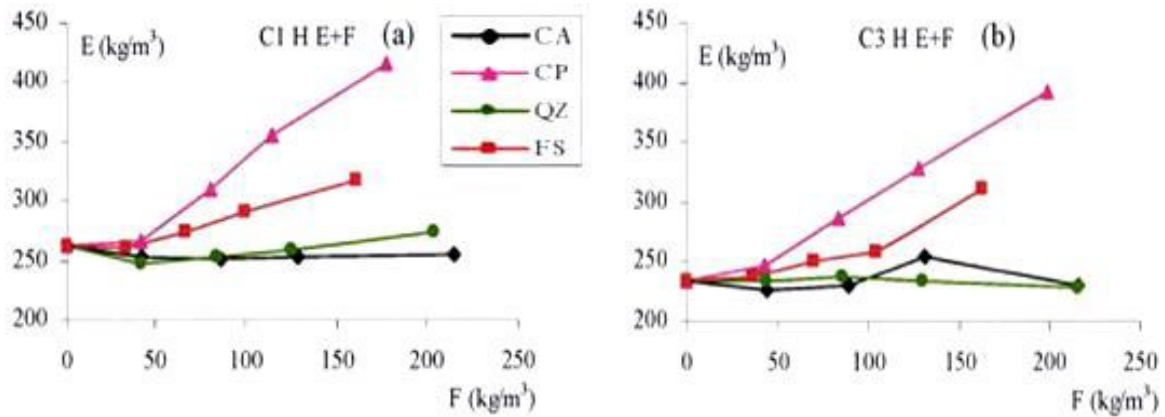


Figure 18. Besoin en eau des mortiers CEM II – additions non adjuvantes en fonction du dosage en additions minérales (CA (Calcite), CP (Calcite Précipitée), QZ (Quartz), SF (Fumée de Silice) [54].

II.3.4 Effet de la distribution granulaire:

L'incorporation des additions minérales entraîne une modification de la distribution granulaire, l'apparition de nouveaux sites de nucléation et une nouvelle activité des surfaces des grains ce qui amène à améliorer l'ouvrabilité du béton. De Larard et al. [55] ont montré, avec les résultats présentés sur la figure 20 que l'amélioration de la maniabilité des mortiers et des bétons varie selon la quantité de fumée de silice incorporée qui modifie la distribution granulaire du mélange.

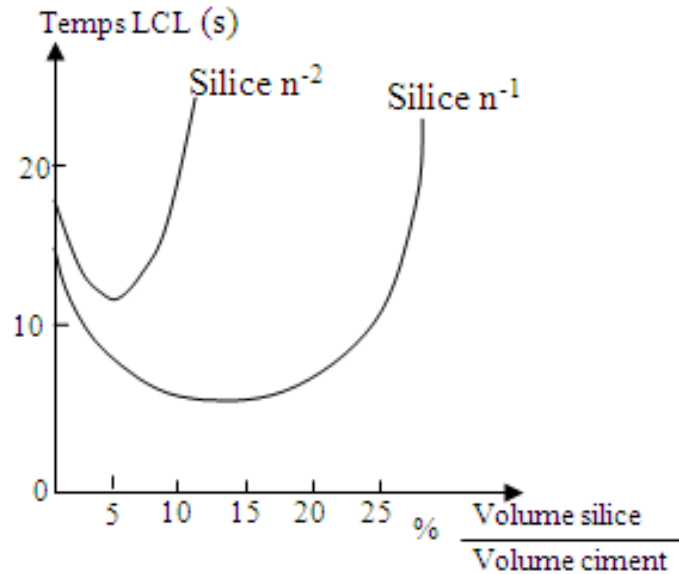


Figure 19. Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier [55].

II.4 Effet des additions minérales sur la rhéologie:

II.4.1 Effet du type de l'addition:

L'incorporation de fumée de silice rend parfois le béton collant, bien que les avis soient partagés sur cet aspect. Pour certains auteurs [51, 59, 60], elle augmente le seuil de cisaillement et la viscosité tout en améliorant la compacité des mélanges. En revanche, Carlswald et al. [61], constatent que la fumée de silice ne modifie pas la viscosité par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence. Dans le même sens, Ferraris et al. [59], montrent que l'utilisation de la fumée de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou bien pour des bétons. Selon les résultats d'Aitcin et al. [62], la viscosité augmente rapidement en fonction du dosage en fumée de silice sans l'utilisation de superplastifiant. Park et al. [51] ont montré, en étudiant les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires contenant des additions minérales en utilisant le rhéomètre, que dans les mélanges ciment-additions de fumée de silice, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique augmentent en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'addition (Figure 21).

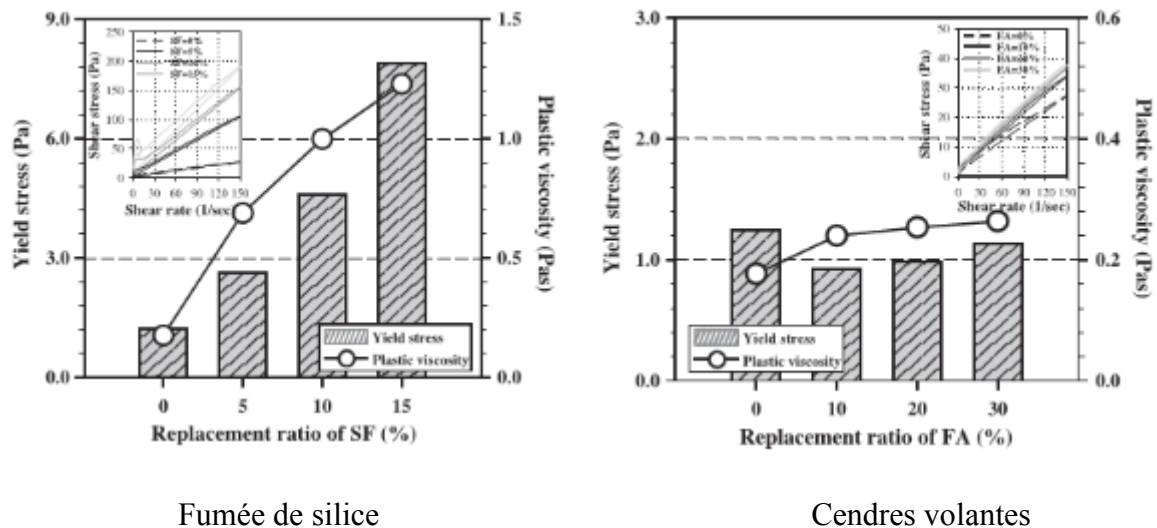


Figure 20. Effets du type de l'addition minérale sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [51].

Le filler calcaire semble avoir une faible influence sur la demande en eau, et peut conduire à une légère diminution de la viscosité du mélange cimentaire [63,64]. Ceci peut justifier l'utilisation de cette addition à des dosages élevés dans la formulation des bétons (BAP et BHP). Cependant, plusieurs auteurs ont remarqué que, pour un dosage constant en ciment (ou un rapport E/C constant), l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer la viscosité d'une pâte de ciment (malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides), avant de provoquer une augmentation de la viscosité lorsque son dosage dépasse une certaine valeur critique, qui dépend du rapport E/C [65,43]. Sur une étude de l'effet des additions ultrafines sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment, Zhang et Han [65] ont conclu que le seuil de cisaillement augmentait avec la quantité d'addition ultrafine incorporée, mais la viscosité de la pâte variait avec la nature et la quantité d'addition.

II.4.2 Effet du taux de substitution:

Pour la fabrication des bétons de hautes résistances et auto-compactant, la figure 22 présente que l'ouvrabilité d'un béton augmente avec le pourcentage de fumée de silice pour un rapport eau/liant constant [66]. Lorsque les fillers calcaires sont ajoutés au béton, les propriétés rhéologiques résultant sont liées à la quantité incorporée. Le tableau 2 illustre les résultats de différents tests sur des bétons autoplaçants où après un certain seuil la dégradation des comportements rhéologique est significative [67]. De même, les tests effectués par Shen [68] dans le laboratoire LGC, ont conduit à trouver une fourchette d'étalement de 34 à 36 cm pour le mortier constitué du CEM I 52,5R.

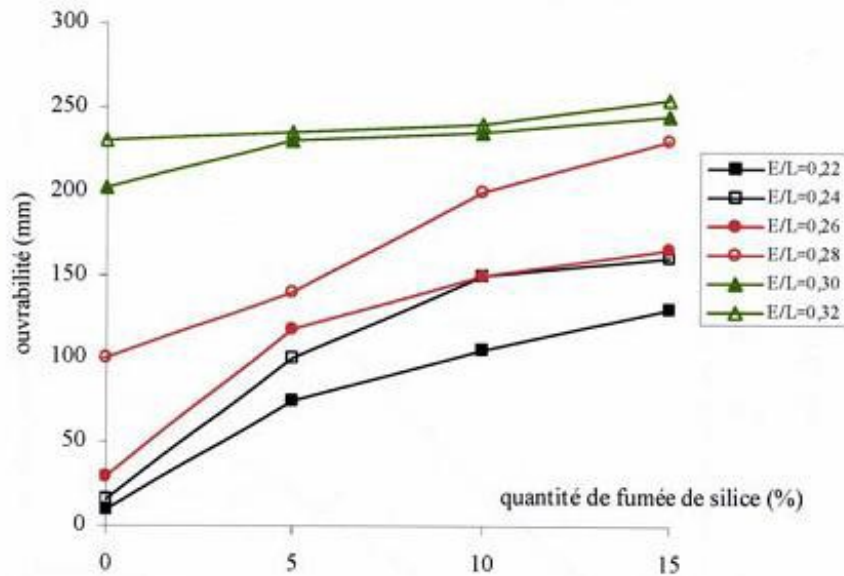


Figure 21. Variation de l’ouvrabilité d’un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant [66]

Tableau 2. Propriétés du béton autoplaçants en présence des fillers calcaires [67]

% de LP	Essais	Affaissement (mm)	Étalement (sec)	V funnel (sec)	Boîte en L (h2/h1)	Boîte en U (mm)
0	RM	630	3.47	7.6	0.68	12
5	M1	637	4.1	8.4	0.74	16
10	M2	651	4.27	9.2	0.79	21
15	M3	665	4.43	10.5	0.85	24
20	M4	674	4.57	11.3	0.92	28
25	M5	585	5.4	13.5	1.2	33
30	M6	576	6.15	14.7	1.6	37
RL	-	600-800	2-5	6 -12	0.8-1	0-30

Plusieurs recherches ont été conduites pour modifier les propriétés rhéologiques et mécaniques en utilisant les particules fines du laitier. Il a été constaté que cet ajout augmente l'étalement de la pâte fraîche et densifie la microstructure due à son activité hydraulique latente [51]. La demande en eau des ciments au laitier est plus faible que celle des ciments purs due au retardement de l'hydratation du laitier. L'addition d'un laitier moins réactif que le ciment réduit la quantité d'ettringite formée au jeune âge d'hydratation causant ainsi une amélioration de l'ouvrabilité du mortier [69]. Shafiqh et al. [70] ont conclu que le niveau optimal de substitution du laitier pour atteindre une maniabilité maximale, pour un béton léger, se situe entre 20 et 30%. L'incorporation de la pouzzolane naturelle au ciment a des avantages sur les propriétés rhéologiques

du béton à l'état frais. La pouzzolane participe à l'obtention d'une ouvrabilité satisfaisante avec une légère perte pour des taux élevés comme le montrent les résultats illustrés sur le tableau 3 [71]. L'utilisation croissante de la pouzzolane naturelle entraîne une diminution des diamètres d'étalement, cette diminution de l'étalement est due à la forte demande en eau et en superplastifiant de la pouzzolane utilisée. Ce résultat peut être traduit par la finesse élevée de cette addition minérale par rapport à la finesse du ciment, et aussi par la présence d'alumine (Al_2O_3) dans la pouzzolane naturelle. Ce composant chimique a une influence sur la consommation du superplastifiant qui a pénalisé l'étalement [72].

Tableau 3. Caractérisation des bétons d'étude à l'état frais. [71].

Essais	Bétons	BT	B1	B2	B3	B4	B5	B6
		(0%)	(10%)	(15%)	(20%)	(25%)	(30%)	(35%)
ETALEMENT	Ø (cm)	70	70	69.5	69	68.5	68.5	68
	T 50 (s)	2.3	2.3	2.3	2.3	2.1	2.1	2
Boite en L	H1/H2	0.81	0.81	0.81	0.82	0.83	0.83	0.83
	T20(s)	1.1	1.1	1.1	1	1	1	1
	T40(s)	3.5	3.5	3.5	3.2	3.1	3.1	3.1
	T60(s)	5.8	5.8	5.7	5.6	5.6	5.6	5.6
Stabilité au tamis (%)		7.66	7.87	7.96	8.34	8.67	8.86	9.07
J-Ring	2hr-hm (mm)	11.1	11.07	11.67	10.46	10.34	10.26	10.08
Essai de ressuage (%)		1.12	1.07	1.07	1.05	1.05	1.04	1.02

II.4.3 Effet combinés superplastifiant-additions minérales:

Les résultats conduits sur les BAP frais, en utilisant l'essai de slump flow, J-Ring et L-Box, montrent que l'ajout de fillers ayant une grande surface de Blaine améliore la fluidité du BAP. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe sur la demande en superplastifiant de façon significative. Une étude expérimentale fut réalisée par Saada et al. [73] où des ciments de finesse variable ont été recomposés en mélangeant en proportions variables un ciment Portland à des fillers calcaires ou siliceux. Les résultats, illustrés sur la figure 23, montrent que le seuil de cisaillement, mesuré pour plusieurs surfaces spécifiques et différents superplastifiants, augmente avec la finesse et que l'efficacité de l'adjuvant dépend de la nature du filler [74].

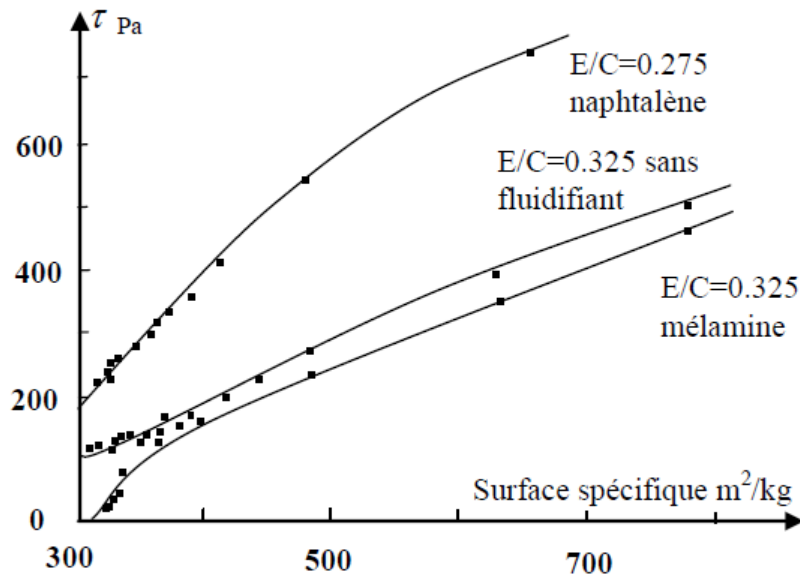


Figure 22. Influence de la surface spécifique du ciment sur le seuil de cisaillement [74]

II.5 Bénéfices de l'utilisation des additions minérales :

L'utilisation des additions minérales dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

II.5.1 Bénéfices fonctionnels :

- Incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des additions d'une grande finesse).
- il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.
- il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.
- Ils peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés.
- Prise et durcissement pour les additions qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau.

II.5.2 Bénéfices économiques :

- La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation)
- Comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible.

II.5.3 Bénéfices écologiques et environnementaux :

- Diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière.
- élimination des sous-produits de la nature

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique. De fait, le remplacement du ciment Portland par les additions minérales réduit d'autant les émissions de CO₂. En général, l'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de CO₂ par tonne de LGHF (laitier granulé de haut fourneau) produit. À cela, il faut ajouter les émissions de CO₂ causées par le transport des matériaux jusqu'au chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'addition cimentaires sur une distance de 1 000 Km libère environ 0,022 tonne de CO₂. Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques des additions cimentaires sur le ciment. [88]

II.6 Conclusion :

Les additions minérales ont été entrées dans l'industrie du génie civil il n'y a pas longtemps, en raison de leurs avantages dans le béton ou dans l'environnement qui améliore la résistance à long terme, éliminer le problème de sous-produits provenant de l'industrie et leur coût, Ainsi l'incorporation des ajouts minéraux à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton, à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO₂ de l'industrie cimentière dans la nature .

Chapitre III. Matériaux, formulation et essais expérimentaux

III.1 Introduction :

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et les méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux dans cette recherche. Commencant avec la caractérisation des matériaux utilisés dans notre programme tels que le ciment, sable et les différentes additions. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possibles que si les différents constituants sont bien caractérisés. Ensuite des essais sont réalisés sur le mortier à l'état frais afin de pouvoir étudier l'ouvrabilité et la rhéologie du mortier. Suivie par des essais sur le mortier à l'état durci pour déterminer les résistances mécaniques, coefficient d'absorption et vérifications de squelette intérieur de mortier par le test d'ultra sonique.

III.2 Caractérisation des matériaux :

III.2.1 Sable : sable provenance des matériaux

a. Analyse granulométrique de sable :

L'essai de l'analyse granulométrique (Photo 24) permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Le sable passe à travers une série de tamis décroissante des mailles en (mm)



Photo 23. Tamiseuse électrique

$$F = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad (6)$$

Où :

M_1 : masse sèche de sable.

M_2 : masse sèche de sable refus 80 μm .

P : masse du tamisât restant dans le fond.

F : pourcentage de fines passant à travers le tamis.

D'où on trouve : $F = 98.74 \%$

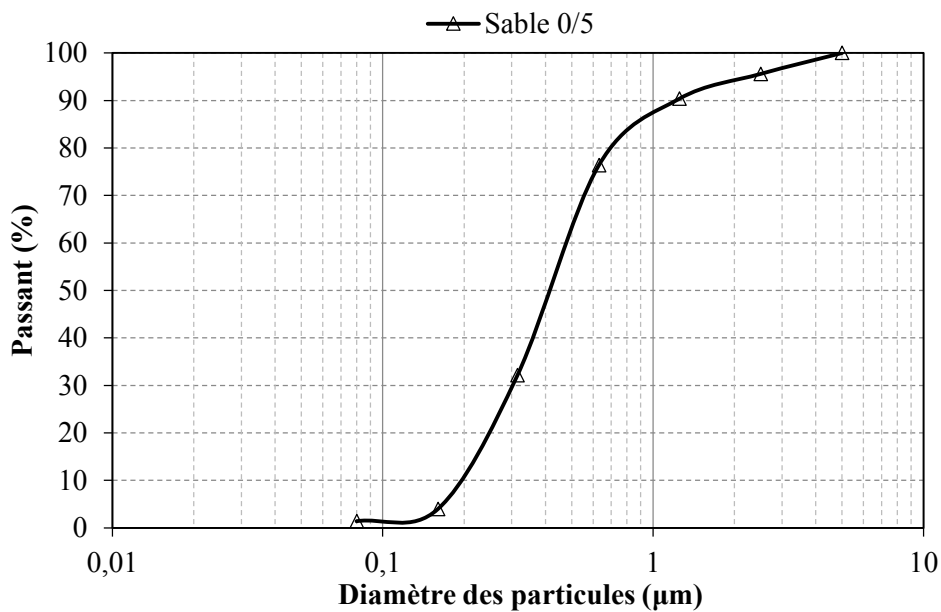


Figure 24. Analyse granulométrique du sable.

$$Mf = \frac{1}{100} \sum_{-5} \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50\} \quad (7)$$

Où :

Mf : module de finesse de sable.

D'où on trouve : $Mf = 2.02$

b. Equivalent de sable :

Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté du sable entrant dans la composition du béton. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sable. On détermine l'équivalent de sable selon la norme NFP 18-598 [94] à l'aide de la formule suivante :

$$E_s = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (8)$$

Où :

h_1 : hauteur du niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette.

h_2 : hauteur du niveau supérieur de la partie sédimentée.

La hauteur h_2 est donc mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine :

E_{sv} : 89% (Équivalent de sable visuel).

E_{sp} : 85% (Équivalent de sable au piston) ;

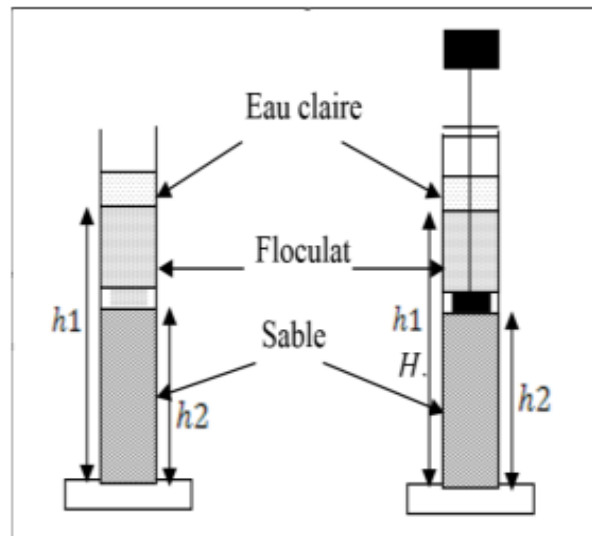


Figure 25. Equivalent de sable à vue et au piston [41].

c. Coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par une imbibition partielle en eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition partielle est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20°C à la pression atmosphérique. Pour le sable il faut utiliser le cône et le piston, et déterminer par la formule suivante :

$$A_b = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (9)$$

Où :

A_b : coefficient d'absorption d'eau.

M_h : la masse humide.

M_s : la masse sèche.

Pour notre cas le coefficient d'absorption d'eau $A_b = 0.59$



Photo 26. essai d'absorption de sable.

III.2.2 Ciment :

Une poudre fine artificielle, obtenue par broyage du mélange d'un clinker et éventuellement d'un ou plusieurs additifs. Ce clinker provient d'un ensemble d'étapes de cuisson effectuées sur le mélange primaire de calcaire et l'argile (25% d'argile et 75% de calcaire). Le choix d'un ciment se fait à partir de sa classe, de sa résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu. D'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine.

Pour cette étude, le ciment utilisé est un ciment portland de classe 42.5 «CEM I/42.5 et CRS», il provient de l'usine de Biskra. Sa teneur en clinker est au moins 95 % (Figure 28).



Photo 27. Ciment utilisé dans la confection des mortiers autoplaçants.

a. *Masse volumique absolue :*

C'est le rapport de la masse de ciment (m_c) sur son volume (v_c), qui est calculé par l'équation suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{m_c}{v_c} \quad (10)$$

D'où on trouve : $\rho_{abs} = 3.09 \text{ g/cm}^3$



Photo 28. Essai de la masse volumique absolue du ciment.

b. Surface spécifique : (appareils de Blain)

Représente la surface totale des grains contenus dans une unité de masse :

$$SSB = K \times \sqrt{t} \times \frac{1}{\rho_c} \times \frac{\sqrt{p^3}}{1-p} \times \frac{1}{\sqrt{0.1\eta}} \quad (11)$$

Où :

K: constante de l'appareil

t : le temps

ρ_c : la masse volumique de l'échantillon

p : la porosité

η : viscosité de l'aire

D'où en trouve : $SSB = 3291.86 \text{ cm}^2/\text{g}$

c. Analyse chimique et minéralogique du ciment :

L'analyse chimique et minéralogique de ciment utilisé dans cette étude est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 4. Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.

<i>Composition</i>	<i>Eléments</i>	<i>Teneur %</i>
<i>Composition chimique</i>	<i>SiO₂</i>	19.58
	<i>Al₂O₃</i>	5.12
	<i>Fe₂O₃</i>	6.45
	<i>CaO</i>	64.2
	<i>MgO</i>	1.43
	<i>SO₃</i>	2.19
	<i>K₂O</i>	0.25
	<i>Na₂O</i>	0.25
<i>Composition minéralogique</i>	<i>C₃S</i>	62
	<i>C₂S</i>	13
	<i>C₃A</i>	1.5
	<i>C₄AF</i>	17

III.2.3 Additions :

Les additions que nous avons utilisées dans notre recherche sont des éléments qui représentent des dimensions inférieurs à $80\mu\text{m}$: poudre de marbre, déchet de brique et metakaolin.

a. Poudre de marbre :

La poudre de marbre (Figure 30) faisant l'objet de cette étude est un déchet résultant de coupe, façonnage et lustration des pierres de marbres. Cette poudre a été fournie par la société MCA (Marbre Carrelage et Agglo-marbre installée à Bordj Bou Arreridj).



Photo 29. Les différentes additions

b. Déchet de brique :

Sont des sous-produits de l'industrie des produits rouges. Ils se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets (briques non conformes où cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions), ces déchets sont broyés à une finesse importante pour obtenir une poudre très fine de déchet de brique (Photo 30).

c. Metakaolin :

Le metakaolin est un type d'argile blanche (kaolin) calcinée à 850°C (Figure 30), il est considéré comme une matière pouzzolanique en raison de sa surface spécifique élevée et de la silice amorphe qui entre dans la composition de aluminosilicate.

Les propriétés physico-chimiques des additions utilisées sont données dans le tableau 6.

Tableau 5. Propriétés physico-chimiques des additions minérales

<i>Elément</i>	<i>Poudre de marbre</i>	<i>Déchet de brique</i>	<i>Metakaolin</i>
S_iO_2	0.42	65.93	49.30
CaO	56.01	6.78	0.08
MgO	0.12	2.25	0.40
AL_2O_3	0.13	14.60	33.00
Fe_2O_3	0.06	5.24	2.37
SO_3	0.01	0.05	-
K_2O	0.01	3.13	2.93
TiO_2	-	0.74	0.24
Na_2O	0.43	0.14	0.09
P_2O_5	-	0.13	-
<i>P.A.F</i>	42.78	1.02	10.5
<i>densité (g/cm³)</i>	2.91	2.54	2.45
<i>finesse (cm²/g)</i>	3206	3400	8332

III.2.4 Superplastifiant :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau fabriqué par la société Granitex et commercialisé sous le nom MEDAFLOW30 (Photo 31). Il est à base d'éther polycarboxylique modifié. Sa plage normale d'utilisation est fixée par 0.5% à 2% (en extrait sec) du poids de ciment. Il est sous forme liquide de couleur jaunâtre.



Photo 30. Superplastifiant ‘ MEDAFLOW30 ‘

III.2.5 Eau de gâchage :

L'eau de gâchage doit être propre pour la préparation de différents mélanges, l'eau potable de robinet a été utilisée dans notre travail.

III.3 Formulation du mortier autoplaçant :

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BAP lui-même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement. En l'absence d'un rhéomètre pour mesurer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, la fluidité du mortier a été évaluée par l'essai d'étalement et l'essai de l'entonnoir (V-funnel) qui ont été utilisés par plusieurs chercheurs.

Pour la formulation du mortier autoplaçant dans notre étude, on s'est basé sur la méthode OKAMURA avec une amélioration au niveau de la teneur en sable, le rapport Eau/Liant (E/L) et le rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L) pour s'adapter aux propriétés des matériaux locaux et en particulier le sable. La sélection du rapport sable/mortier et du rapport Superplastifiant/Liant est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre $27 \text{ cm} \leq d \leq 33.5 \text{ cm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre $2 \text{ s} \leq t \leq 10 \text{ s}$.

III.3.1 Rapport Eau/Liant (E/L) :

Nous avons effectué beaucoup d'essais préliminaires de mesure d'étalement et de temps d'écoulement afin de fixer le rapport eau/liant (E/L). Felekoglu et al [40] ont montré que le rapport E/C optimum pour produire un BAP est compris dans l'intervalle 0,84 et 1,07 en volume qui correspond à l'intervalle 0,28 et 0,45 en masse. Les rapports E/C au-dessus et en dessous de cet intervalle peuvent causer un blocage ou une ségrégation du mélange. Les différents essais préliminaires ont montré qu'il faut aller jusqu'au rapport eau/liant 0,40 afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un étalement supérieur à 27 cm surtout dans le cas de faible dosage en superplastifiant. Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0,40.

III.3.2 Rapport Sable/Mortier (S/M) :

L'optimisation du rapport Sable/Mortier consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer par la suite des bonnes caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports Sable/Mortier de 0,4, 0,5 et 0,6 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/liant (Sp/L).

III.3.3 Variation du rapport Superplastifiant /Liant (Sp/L) :

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en superplastifiant sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement (mini-cône) et du temps d'écoulement (V-funnel), en fonction du dosage en superplastifiant Sp/L variant de 0.9% à 1.4%.

III.3.4 Remplacement du ciment par les additions :

Après avoir déterminé la teneur en eau, la teneur en sable et le dosage en superplastifiant, nous pouvons dire qu'on a obtenu la composition optimale du mortier autoplaçant de référence tout on maintient fixe les deux rapports S/M a 0.5 et un dosage en eau E/L a 0.4, et chercher la meilleure formulation du MAP de référence. Comme point de départ, on prend le résultat des essais sur mortiers, du rapport SP/L avec quelques mesures d'étalement (au mini cône) et de temps d'écoulement à l'entonnoir en V, pour trouver le meilleur rapport Sp/L donnant un bon mortier autoplaçant sans ségrégation et ressuage. Une fois que le MAP de référence est obtenu, tout en ajustant le rapport SP/L fixe. Donc l'étape suivante consiste à étudier l'influence des additions (poudre de marbre, déchet de brique et metakaolin) sur les propriétés de MAP à l'état frais. Pour cela, nous allons substituer le ciment du mélange de référence par la poudre de marbre, déchet de brique et metakaolin en combinaison binaire ainsi par la poudre de marbre-déchet de brique, poudre de marbre-metakaolin en combinaison ternaire.

Tableau 6. Différentes formulations utilisées.

Type de ciment	Type d'addition	Nomination
CEMI	-	100C
Binaire	PM	5PM
		15PM
		25PM
	DB	5DB
		15DB
		25DB
	MK	5MK
		10MK
		15MK
Ternaire	PM+DB	15PM15DB
		15PM25DB
	PM+MK	15PM10MK
		15PM15MK

Note : 5PM = 5% de poudre de marbre+95% du ciment CEMI.

Note: OPC = Ordinary portland ciment.

III.4 Essais expérimental :

III.4.1 Essai d'étalement au mini cône :

L'essai consiste à remplir un mini cône en mortier autoplaçant, et à le soulever verticalement une fois que le cône est enlevé, le MAP s'étale sur la plaque. Après l'arrêt de l'écoulement, on mesure l'étalement selon deux diamètres perpendiculaires d_1 et d_2 (Figure 32). L'étalement final est la moyenne des deux valeurs obtenues. Un contrôle visuel de la galette du mortier peut s'avérer intéressant.



Photo 31. Exécution et mesure d'étalement au mini-cône

III.4.2 Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel) :

Cet essai consiste à remplir l'entonnoir en V en mortier autoplaçant tout en maintenant le clapet situé à la base de l'entonnoir fermé. Toute fois en démarre le chronomètre Dé en relâche le clapet pour permettre au MAP de s'écouler à travers l'orifice. Le temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de clapet de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure 33).



Photo 32. Exécution et mesure d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel)

III.4.3 Essai au rhéomètre :

Le rhéomètre utilisé est un rhéomètre de type Couette développé par l'équipe de recherche de l'université de Laghouat. Ce type est généralement considéré comme étant le mieux adapté pour des suspensions concentrées possédant un seuil de cisaillement. Le principe consiste à mettre

en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de mortier frais et de mesurer le couple appliqué.

Pour déterminer, expérimentalement, le comportement rhéologique des mortiers, on a utilisé un rhéomètre rotatif ; Heidolph- RZR 2102 Control Z. Ce rhéomètre présenté sur la (Photo 34) est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation (Figure a), une pale composé de deux plaques perpendiculaires de dimensions 5x10 cm (Figure b) et d'un récipient cylindrique de dimension 10x13 cm (Figure c). Le schéma de la figure récapitule le fonctionnement de ce rhéomètre avec un système d'acquisition des données sur ordinateur. Le rhéomètre Heidolph- RZR 2102 Control Z peut fonctionner en imposant des taux de cisaillement appliqués sur le mortier d'où on obtient les contraintes de cisaillement. A partir de la courbe qui représente les contraintes de cisaillement en fonction des taux de cisaillement, on peut déterminer le comportement rhéologique de chaque mortier. Le Heidolph- RZR 2102 Control Z est piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur. Ensuite, il faut régler la température manuellement et la garder constante pour tous les essais.



Photo 33. Dispositif du rhéomètre utilisé.



a) Agitateur



b) Pale



c) Récipient

a. Profil de vitesse imposée :

Le profil de vitesse utilisé est choisi sur la base d'une série d'essai qui consiste à trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation [77]. Le profil utilisé doit avoir suffisamment des points pour pouvoir bien caractériser le comportement du mortier. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires (Ω , M)(Figure 35).

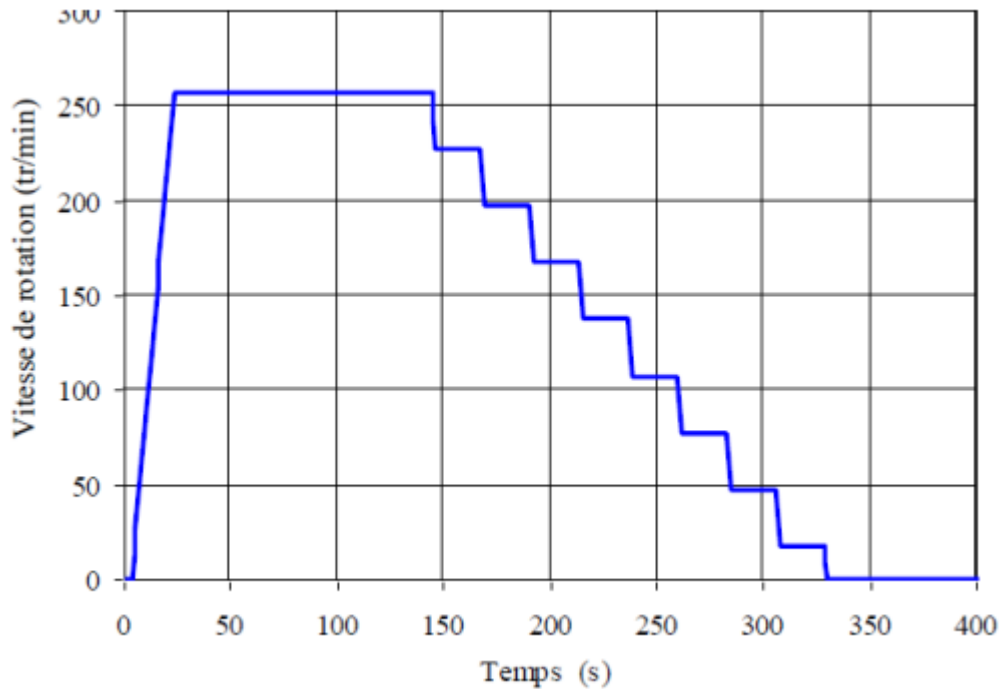


Figure 34. Profil de vitesse [77]

b. Déroulement de l'essai :

Afin d'étudier les comportements rhéologiques des différents mortiers, Il permet l'enregistrement des couples en fonction des vitesses de rotation imposées. Le fonctionnement de l'agitateur est piloté par un ordinateur à l'aide d'un logiciel (Watch & control). On a utilisé le rhéomètre en suivant les étapes suivantes :

1^{ère} étape : mesure des couples à vide (M vide). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est vide.

2^{ème} étape : positionnement de la pale. Elle est centrée (suivant le diamètre du récipient) puis plongée au milieu la pale jusqu'à l'arase du mortier.

3^{ème} étape : mesure des couples totaux (M total). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est rempli.

4ème étape : calculs des couples finaux (M). Les couples finaux s'obtiennent par la différence entre les couples totaux et les couples à vides pour chaque palier de vitesse

$$M = M_{total} - M_{vide} \quad (12)$$

5ème étape : exploitation des mesures et calculs des paramètres rhéologiques.

c. Mesure des paramètres rhéologiques :

Pour mieux visualiser le fonctionnement du rhéomètre et la déduction des paramètres rhéologiques des différents mortiers. L'exploitation des mesures rhéométriques consiste à déterminer l'évolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) à partir de la paire ($M_i - \Omega_i$) mesurée. La vitesse de cisaillement s'exprime par les équations (13) et (14). En assimilant le comportement du MAP à un fluide binghamien, deux cas sont envisageables : le cisaillement peut être total ou partiel.

$$\dot{\gamma} = 2M \times \frac{d\Omega}{dM} \quad (13)$$

$$\dot{\gamma} = 2 \times \frac{M \frac{d\Omega}{dM}}{\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right)} - \frac{\Omega - M \times \frac{d\Omega}{dM}}{\ln\left(\frac{R_b}{R_c}\right)} \quad (14)$$

Où R_b et h désignent le rayon et la hauteur de la pale et R_c le rayon du récipient. Ω et M représentent respectivement la vitesse de rotation et le couple correspondant.

Le taux de cisaillement ($\dot{\gamma}_i$) engendré par une vitesse de rotation (Ω_i) peut être calculé par l'équation 15 ci-dessous :

$$\dot{\gamma}_i = \text{Max} (\dot{\gamma}_{j [13]} ; \dot{\gamma}_{j [14]}) \quad (15)$$

Avec:

$$\frac{d\Omega_j}{dM_j} \cong \frac{\Omega_{j+1} - \Omega_{j-1}}{M_{j+1} - M_{j-1}} \quad i = j \text{ et } j = \overline{1, n}$$

Ainsi la contrainte (τ_i) correspondante à la vitesse de rotation (Ω_i) s'obtient via l'équation 16 ci-dessous :

$$\tau_i = \frac{1}{2} (\tau_{j-1} + \tau_{j+1}) \quad \text{avec} \quad \tau_j(M) = \frac{M_j}{2\pi h R_b^2} \quad (16)$$

Les équations 15 et 16 permettent de passer du couple ($M_i - \Omega_i$) au couple ($\tau_i - \dot{\gamma}_i$) et de déterminer les paramètres rhéologiques du mortier testé.

III.4.4 Confection et conservation des éprouvettes :

Lorsque la procédure de malaxage est achevée, et après avoir fait tous les essais relatifs aux mortiers à l'état frais, des éprouvettes de types prismatiques (4x4x16) sont coulées sans compactage pour réaliser les essais relatifs aux mortiers à l'état durci. Les éprouvettes sont démoulées après 24h de coulage, ensuite elles sont conservées (Photo 36) dans l'eau sature de chaux à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, jusqu'à à l'âge de l'essai.



Photo 35. Conservations d'éprouvettes

III.4.5 Résistance à la compression « Rc » :

Conformément à la norme NFP 18-406 [80], l'essai de compression s'effectue sur les demi-prismes de l'essai de traction par flexion. Lors de l'essai de compression qui a été effectué au moyen d'une presse universelle, les éprouvettes sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La charge à la rupture F_c et la contrainte σ_c sont données par l'appareil, ou bien la contrainte de compression est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S} \quad (17)$$

Avec :

σ_c : contrainte à la compression en MPa.

F_c : la charge à la rupture en Newton (N).

S : la section de l'éprouvette en mm².

Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm. Augmenter la charge avec une vitesse providence durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (compenser la décroissance de vitesse de la charge à l'approche de la rupture)

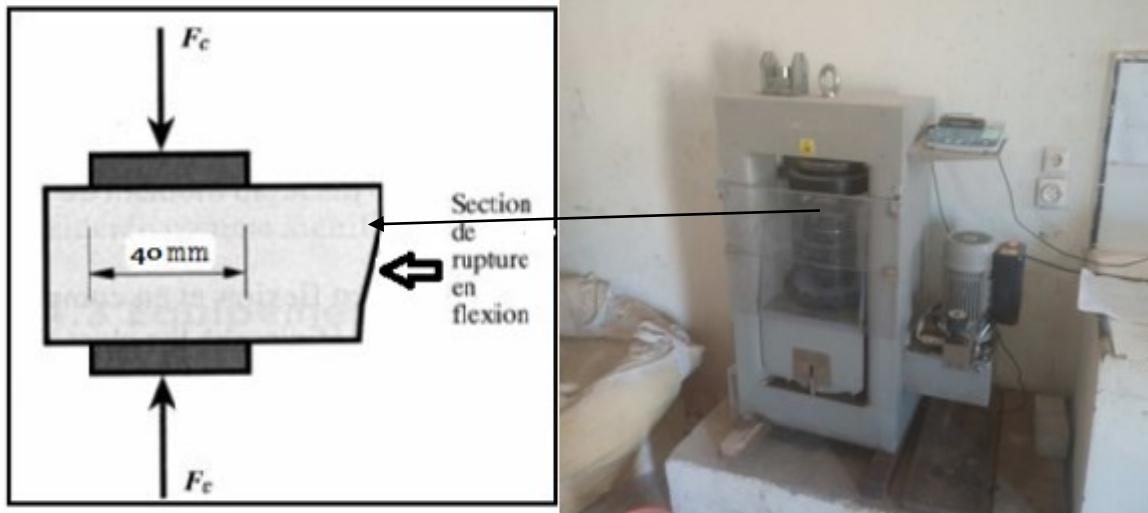


Photo 36. Dispositif pour l'essai de résistance à la compression

III.4.6 Test ultrasonique :

C'est un essai non destructif qui permet d'avoir une idée sur la compacité, donc la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique d'un béton. Il consiste à mettre les deux sondes (émettrice et réceptrice) de l'ultrason entre les deux extrémités d'une éprouvette (4 x 4 x 16) cm âgée de 28 et 56 jours. À partir du temps de propagation des ondes soniques à travers l'éprouvette, on calcule la vitesse de propagation des ondes à partir de la formule suivante :

$$V = \frac{L}{t} \quad (18)$$

Où :

V : vitesse de propagation des ondes en (m/s)

L : distance entre les deux sondes en (m)

t : temps de propagation des ondes (s)



Photo 37. Appareil ultrason

III.4.7 Essai d'absorption par immersion :

Cet essai est réalisé en conformité avec la norme ASTM C642-97 [90]. La méthode consiste à sécher préalablement des éprouvettes prismatiques à l'étuve à 105 ± 5 °C pendant 72 heures. Les éprouvettes sont ensuite retirées et laissées refroidir, puis sont pesées soit M_0 . Par la suite, les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau à 21°C pendant 72 heures (Photo 39). Après cette période, les éprouvettes sont retirées, et après avoir étoffé leurs faces à l'aide d'une serviette, sont pesées de nouveau soit M_1 . Donc le coefficient d'absorption est calculé comme suit :

$$A_{bi} = \left(\frac{M_1 - M_0}{M_0} \right) \times 100 \quad (19)$$

Où :

A_{bi} : coefficient d'absorption en %.

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

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

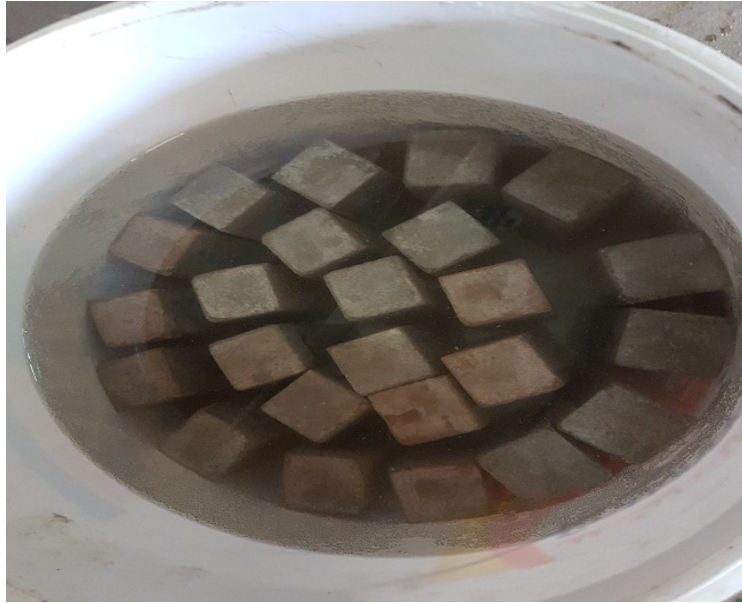


Photo 38. Immersion totale des éprouvettes

Conclusion :

Cette partie a été faite afin de caractériser les matériaux utilisés dans la formulation des mortiers autoplaçants confectionnés à base de différents dosages des additions, pour déterminer le comportement rhéologique et mécanique du mortier autoplaçant, testé en variant le taux de substitution de l'addition minérale soit le metakaolin qui a une couleur orange claire, une grande finesse $8332.68 \text{ cm}^2/\text{g}$. La poudre de marbre avec une couleur blanche et une finesse moindre que les deux autres additions.

Chapitre IV. Analyses et discussion des résultats

IV.1 Introduction :

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus par les différents essais effectués sur les mortiers autoplaçants binaires et ternaires. Après la phase de caractérisation physico-mécanique et expérimentales des différents constituants de base utilisée pour la formulation des mortiers autoplaçant au chapitre précédent, ce chapitre consiste à caractériser le mortier de référence (100C) constitué principalement du sable, de ciment, d'eau et le superplastifiant. En deuxième étape il parvienne notre collaboration essentielle et cela par l'étude des mortiers binaires et ternaires, dans ce cas on s'intéresse par l'étude de l'influence des ajouts minéraux tels que la poudre de marbre, déchet de brique et le metakaolin sur les propriétés rhéologiques et les propriétés mécaniques à court, moyen et à long terme.

IV.2 Essais effectués sur mortiers a l'état frais :

IV.2.1 Mortier de référence :

Le mortier de référence (100C) comme indiquer sur le tableau ci-dessous présente un seuil de cisaillement de 8.93 (Pa) et viscosité de 6,12 (Pa.s) et un étalement de 29.45 cm avec un temps d'écoulement de 6.55 s

Notre recherche a pour objectif d'étudier de l'influence des paramètres de formulation, en particulier l'effet des ajouts minéraux à savoir (la poudre de marbre, déchet de brique et le metakaolin), ainsi que l'effet de superplastifiant sur les paramètres rhéologiques, en comparant les valeurs trouvées au ceux de mortier de référence .

Tableau 7. Résultats de mortier autoplaçant de référence

Mortier de référence				
Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	SP (%)	SP (g)
897.90	1690	361.90	1.2	10.77
Étalement en (cm)		29.45		
Temps d'écoulement (sec)		6.55		
Viscosité en (Pa.s)		6,12		
Seuil de cisaillement en (Pa)		8.93		
Remarque		Mortier homogène et stable		

IV.2.2 Mortier de ciments binaires:*a. Cas de la poudre de marbre :*

Afin de comprendre l'influence de la poudre de marbre sur l'ouvrabilité du mortier autoplaçant à l'état frais nous avons étudié trois compositions (5PM, 15PM et 25PM) avec des taux de substitution de 5%, 15% et 25% (Tableau 8).

Tableau 8. Composition des mélanges et résultats expérimentaux (poudre de marbre)

Substitution du ciment par la poudre de marbre			
Mélange pour 1m³	5PM	15PM	25PM
Poudre de marbre (%)	5	15	25
Ciment (g)	853	763.20	673.40
Poudre de marbre (g)	44.90	134.50	224.50
Sable en (g)	1690		
Eau (g)	361.90		
SP (%)	1.2		
SP (g)	10.77		
Étalement (cm)	30.5	31.25	33.25
Temps d'écoulement (sec)	6.40	5.65	3.95
Viscosité (Pa.s)	7,17	5,83	3.36
Seuil de cisaillement (Pa)	10,44	1,67	2.70
Remarque	Mortier homogène	Mortier homogène	Mortier homogène avec signe de ressuage

a.1. Étalement :

Figure 40 montre la variation d'étalement du mortier en fonction de la teneur en poudre de marbre. Selon les résultats on remarque que l'étalement varie dans l'intervalle de 29.45 cm à 33.25 cm lorsque le pourcentage de poudre de marbre augmente de 0 à 25%, avec une meilleure déformabilité quand le pourcentage de la poudre de marbre est à 25%. Ces valeurs montrent

l'effet bénéfique de la poudre de marbre sur l'ouvrabilité. Ce qui se traduit par la croissance du diamètre d'étalement. On observe dans mortier autoplaçants binaire l'influence du poudre de marbre a été bénéfique jusqu'à 25% au-delà un risque de ressuage.

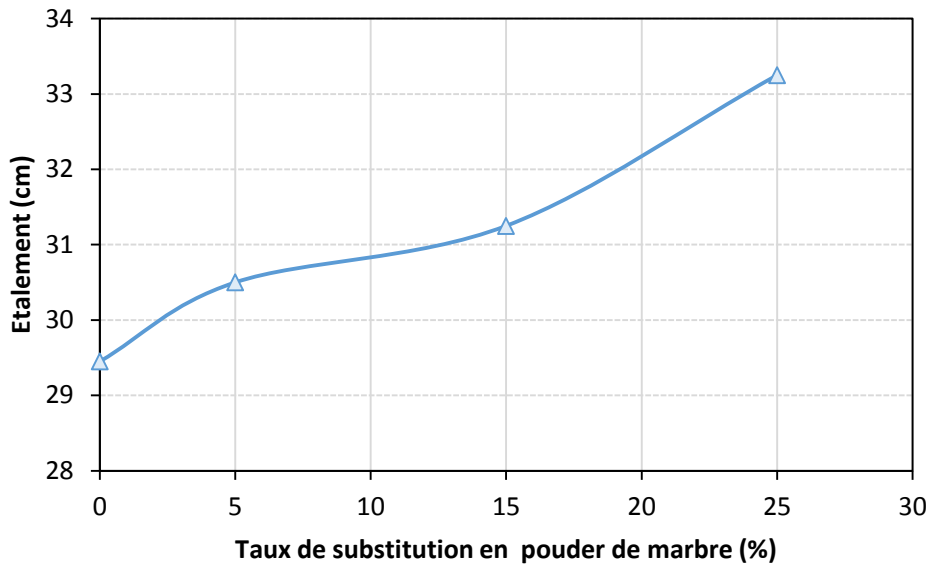


Figure 39. Effet de dosage de poudre de marbre sur l'étalement.

Du fait que la densité de poudre de marbre est moindre par rapport à celle du ciment, la substitution du ciment par la poudre de marbre résulte un volume de pâte plus grand, ce qui a pour effet de diminuer les contacts entre les particules de sable et d'augmenter par conséquent la déformabilité du mortier [95,96].

Selon boukhelkhal [81] l'étalement varie entre 30,7 à 32,3 cm lorsque la teneur en poudre de marbre augmente de 5 à 25%. Ainsi que Ouai et Bedj [82], ont montré que l'influence de la poudre de marbre a été bénéfique jusqu'à 20% au-delà un risque de ressuage est probable.

a.2 Temps d'écoulement :

Les résultats obtenus montrent une diminution du temps d'écoulement de 6,40 ; 5,65 ; 3,95s pour une substitution de 5 ; 15 ; 25% par la poudre de marbre. La diminution du temps d'écoulement est due à l'augmentation de la déformabilité du mortier, ce qui confirme les résultats de la figure précédente. Selon Belaidi et al. [83] Le temps d'écoulement diminue avec l'augmentation de la teneur en poudre de marbre. Ces variations montrent que la poudre de marbre diminue la viscosité des mortiers ce qui apporte une amélioration des caractéristiques rhéologiques des mortiers.

L'effet de dosage de poudre de marbre sur le temps d'écoulement est illustré sur la figure 41 :

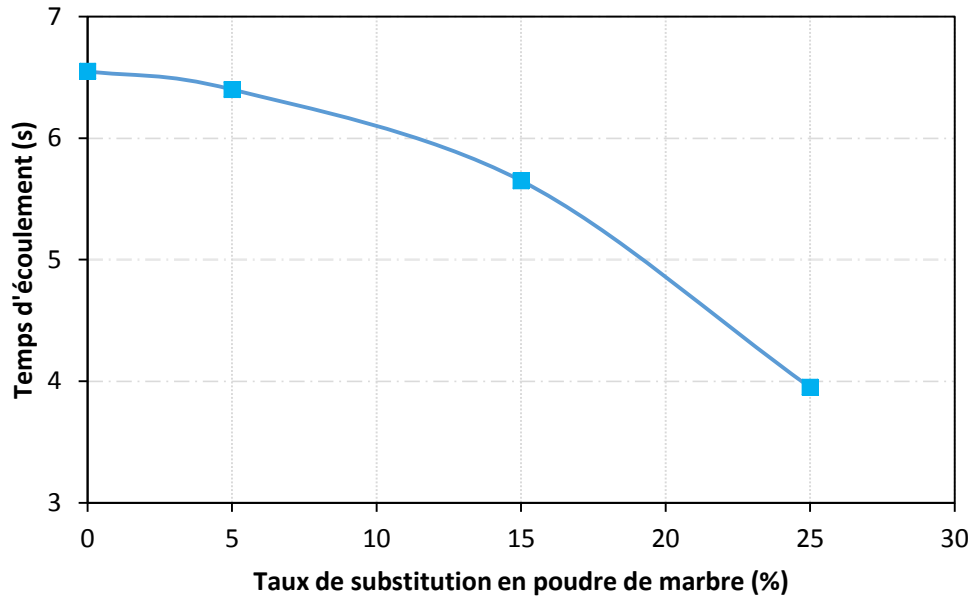


Figure 40. Évolution du temps d'écoulement en fonction de la teneur en poudre de marbre

a.3 Mesure des paramètres rhéologiques :

La figure 42 présente le rhéogramme de comportement rhéologique des mortiers à base des ciments binaire constitué principalement de la poudre de marbre. On constate que la loi de comportement suit une loi Binghamien.

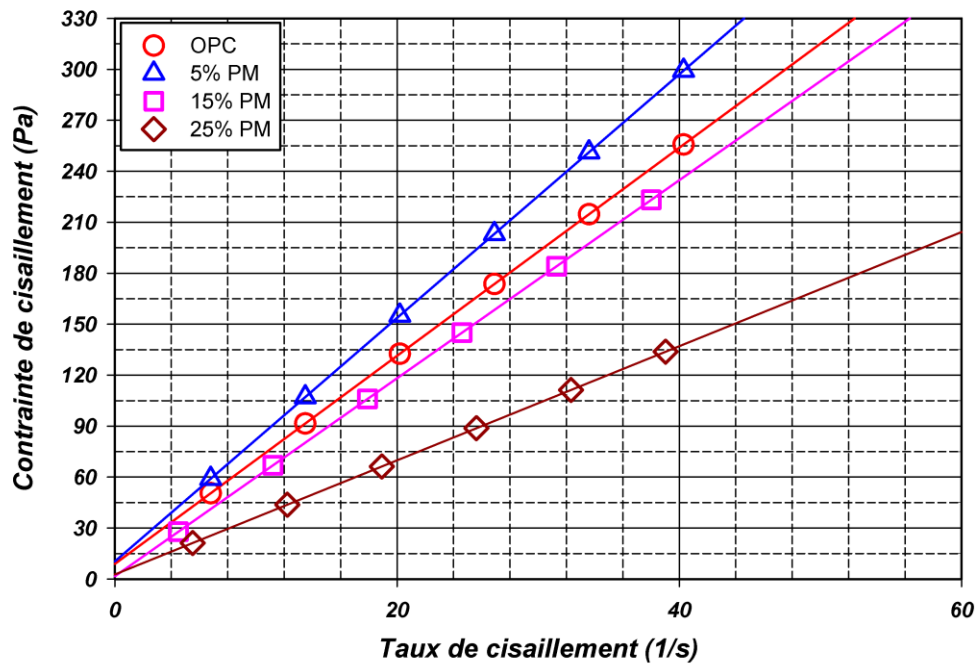


Figure 41. Évolution de la contraite de cisaillement en fonction de taux de cisaillement des mortiers autoplaçant binaire (OPC, 5PM, 15PM, 25PM).

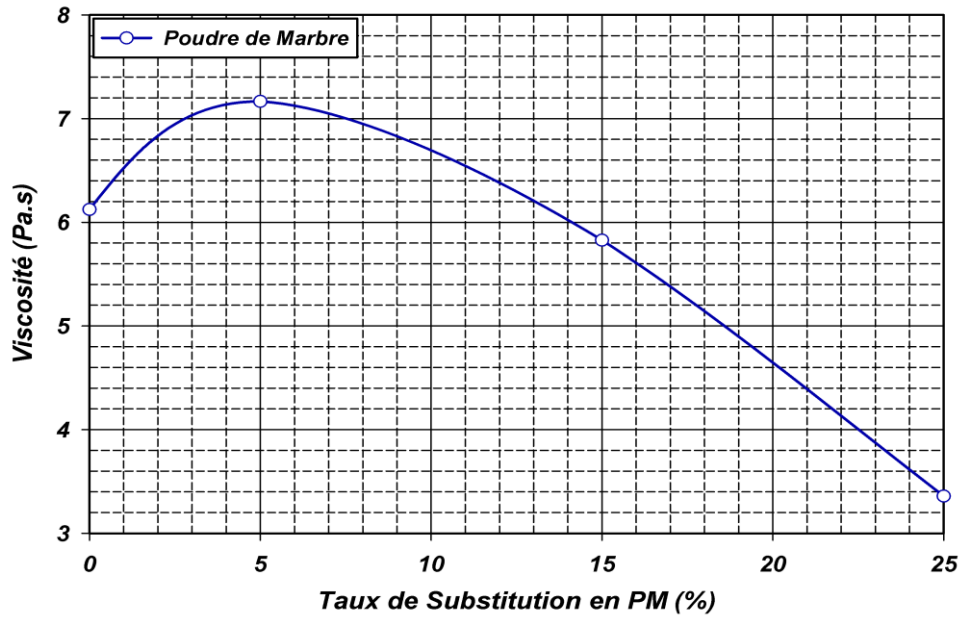


Figure 42. Influence de la poudre de marbre sur la viscosité des mortiers autoplaçant

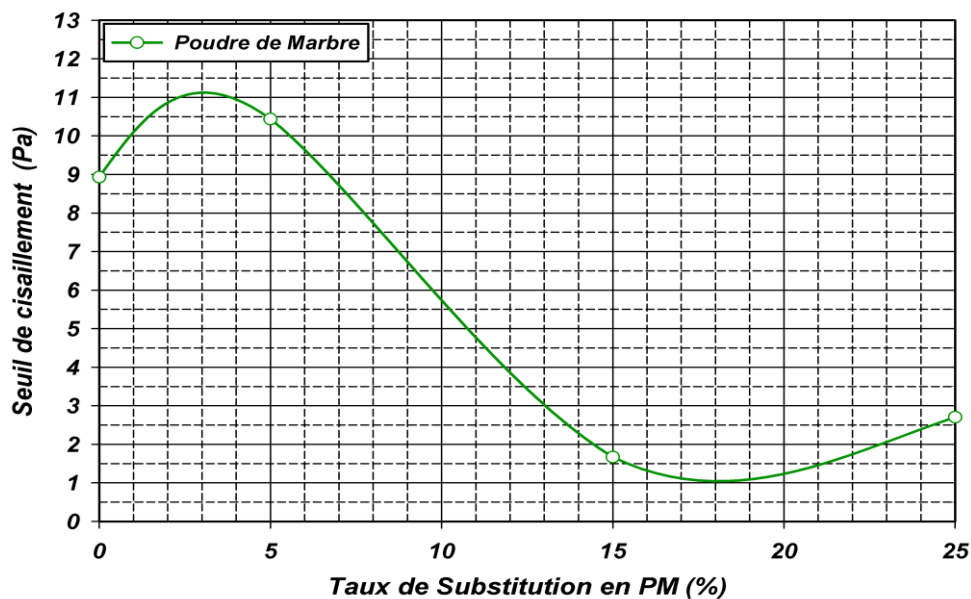


Figure 43. Effet de taux de substitution par la poudre de marbre sur le seuil de cisaillement.

Les figures (43 et 44) représentent l'effet de la substitution du ciment par la poudre de marbre sur la viscosité et le seuil de cisaillement. On remarque que le mélange est fluidifié par l'introduction de la poudre de marbre et plus le pourcentage de la poudre de marbre augmente plus la viscosité de la mélange diminue. La poudre de marbre semble avoir une faible influence sur la demande en eau, et peut conduire à une grande diminution de viscosité du mélange. Donc le mortier binaire (ciment + poudre de marbre) est très fluide. Les résultats présentés sur la figure

43 montrent que la substitution partielle du ciment par la poudre de marbre diminue la viscosité de mélange par rapport mélange référence (100C) de 6.12 à 3.36 Pa.s.

D'après la figure 44 on peut remarquer que le seuil de cisaillement diminue avec l'augmentation de la concentration de la poudre de marbre atteignant une valeur de 2.70 Pa à une concentration de 25% de cette dernière pour reprendre une légère augmentation. Peut être due au fait que la poudre de marbre possède une finesse plus grande que le ciment, ce qui améliore la granulométrie et la compacité et l'ouvrabilité du MAP [97], et par conséquent diminue le seuil de cisaillement. On peut conclure d'après les résultats, que la poudre de marbre influence positivement sur les propriétés rhéologiques.

b. Cas de déchet de brique :

Afin d'évaluer les modifications induites par le déchet de brique sur le besoin en adjuvant. Nous avons testé trois compositions des mortiers autoplaçant confectionnés à base de ciment binaire constitués de ciment et de déchet de brique (5DB, 15DB et 25DB), avec un taux de substitution de ciment par déchet de brique variant entre 5 à 25% (Tableau 9). Notons que le dosage du superplastifiant est changé dans le cas de 25% de déchet de brique de 1.2 à 1.25 puisque on a trouvé des valeurs de l'étalement et temps d'écoulement hors de la fourchette ciblée.

Tableau 9. Résultats de mortier autoplaçant binaire de déchet de brique

Substitution du ciment par déchet de brique			
Mélange pour 1m ³	5DB	15DB	25DB
Déchet de brique (%)	5	15	25
Ciment (g)	853	763.2	673.4
Déchet de brique (g)	44.9	134.7	224.5
Sable en (g)	1690		
Eau (g)	361.90		361.55
SP (%)	1.2		1.25
SP (g)	10.77		11.22
Etalement (cm)	29.6	30.55	31.75
Temps d'écoulement (sec)	8.65	8.50	7.60
Viscosité (Pa.s)	4.97	4.74	4.71
Seuil de cisaillement (Pa)	11.12	6.55	4.43

b.1 Etalement :

La figure 45 montre l'effet de déchet de brique sur l'étalement des mortiers. On remarque que l'ajout de déchet de brique avec des pourcentages croissants augmente l'étalement.

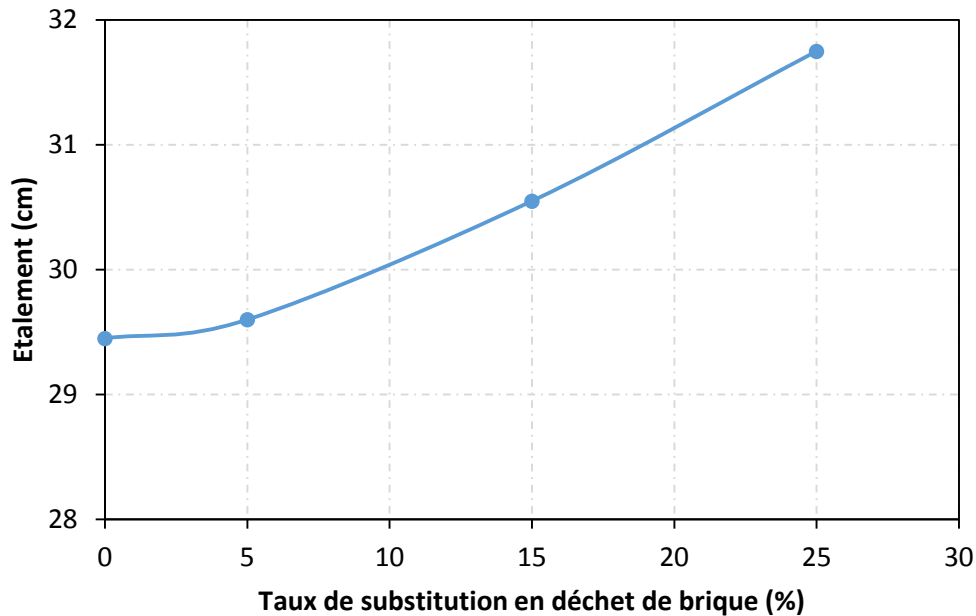


Figure 44. Effet de dosage de déchet de brique sur l'étalement.

Dans la figure 45 on remarque aussi que l'augmentation du taux de substitution du ciment par le déchet de brique conduit à une augmentation de la déformabilité du mortier. On note ici que toutes les valeurs de l'étalement par le mini cône sont dans l'intervalle 29.6 à 31.75 cm, alors les mortier à base de déchet de brique existant dans la gamme autoplaçant. Ces résultats montrent l'effet bénéfique de déchet de brique sur la fluidité. Cette augmentation de la déformabilité des mélanges à base de déchet de brique (5DB, 15DB et 25DB) par rapport à celle de mortier de référence (100C) est due au changement de volume de la pâte (augmente) qui a pour effet de diminuer les contacts entre les particules de la pâte et d'augmenter par conséquent la déformabilité du mortier.

b.2 Temps d'écoulement :

L'effet de dosage de déchet de brique sur le temps d'écoulement est montré dans la figure 46. Les résultats obtenus montrent une diminution du temps d'écoulement. Est due à l'augmentation de la fluidité du mortier autoplaçant qui confirme bien avec les résultats de l'étalement.

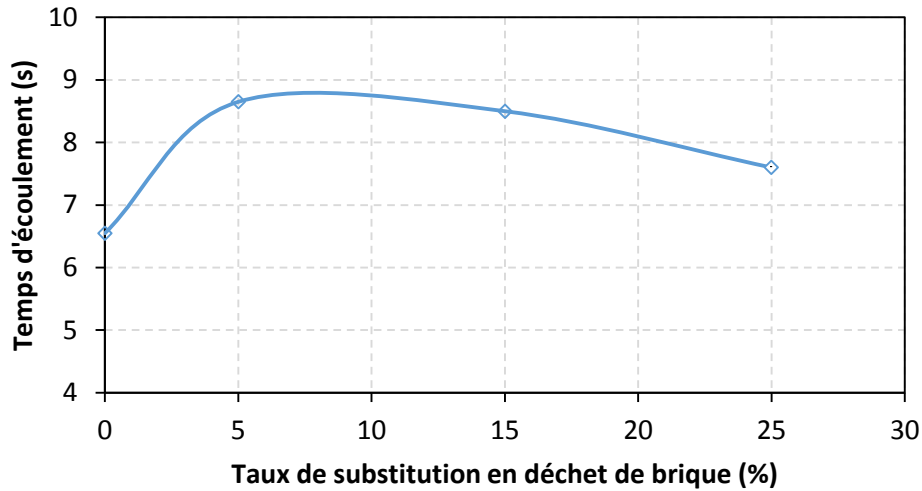


Figure 45. Évolution du temps d'écoulement en fonction de la teneur en déchet de brique

b.3 Mesure des paramètres rhéologiques :

Sur le rhéogramme (figure 47) on peut remarquer que l'évolution de contrainte de cisaillement varie linéairement en fonction de taux de cisaillement ce qui reflète le comportement Binghamien de ces mélanges. On remarque que l'ajout de déchet de brique avec des dosages de 5 ; 15 ; 25% augmente la fluidité des mélanges, est par conséquent le déchet de brique affecte positivement le comportement rhéologique de mélange.

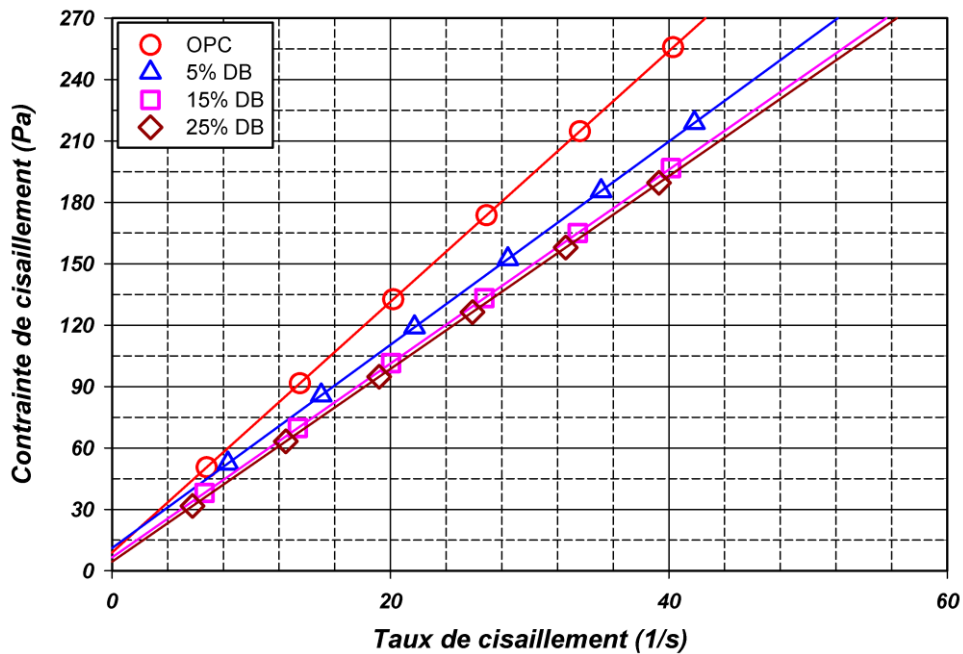


Figure 46. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier autoplaçant binaire (OPC, 5DB, 15DB, 25DB).

D'après les résultats obtenus des propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité) on constate la diminution de ces paramètres ce qui traduit par le gain de fluidité par rapport au mortier de référence. Ce gain peut conduire à une légère diminution de viscosité du mélange. Ceci est dû à sa grande finesse par rapport à celle de ciment et par conséquent réduit la demande en eau. Donc le mortier binaire (ciment + déchet de brique) est un peu fluide on restant toujours dans la gamme autoplaçant.

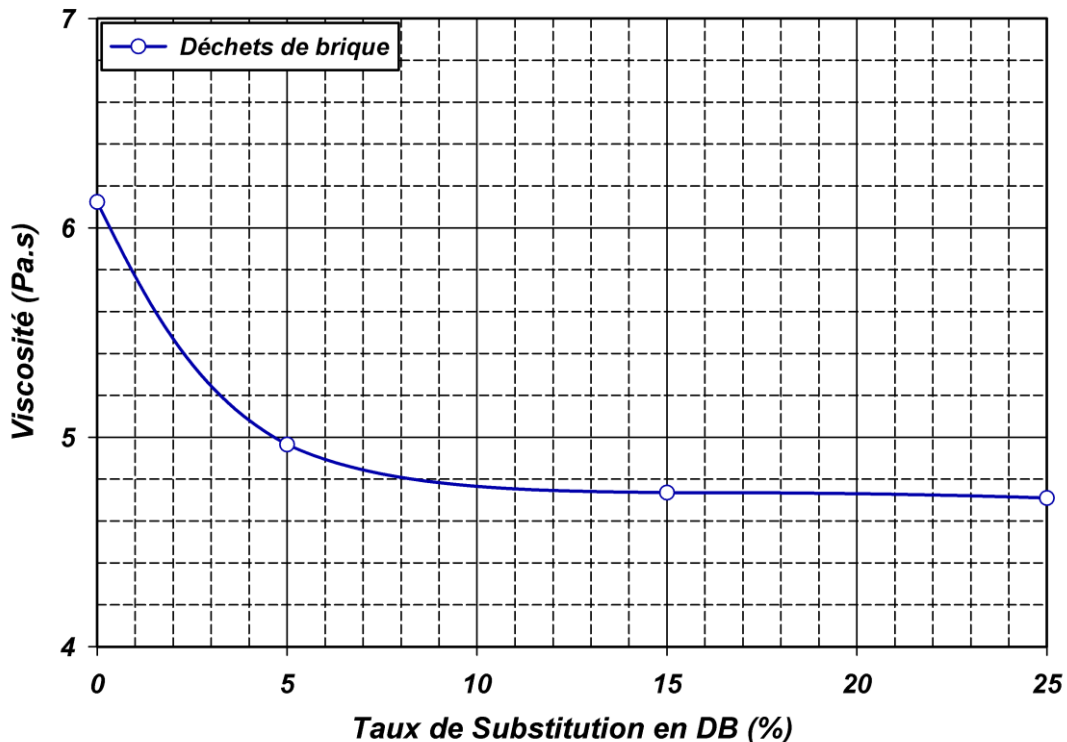


Figure 47. Influence de déchet de brique sur la viscosité des mortiers autoplaçant.

D'après ces résultats présentés sur la figure 48 on remarque que la viscosité du mortier diminue lentement de 4,97 à 4,71 Pa.s par rapport au taux de substitution de 5 à 25% de déchet de brique. Et presque avoir le même effet que la poudre de marbre qui influe positivement sur les propriétés rhéologiques.

À partir de la figure 49, on remarque que les valeurs du seuil de cisaillement de mortier diminuent avec l'augmentation du dosage en déchet de brique. On note que le seuil de cisaillement (τ_0) de mortier à une valeur optimum de 11,12 Pa dans le cas de 5PM après il commence à diminué jusqu'à 4,43 Pa pour le 25DB. Un comportement similaire à était observé sur l'effet de déchet de brique sur la viscosité.

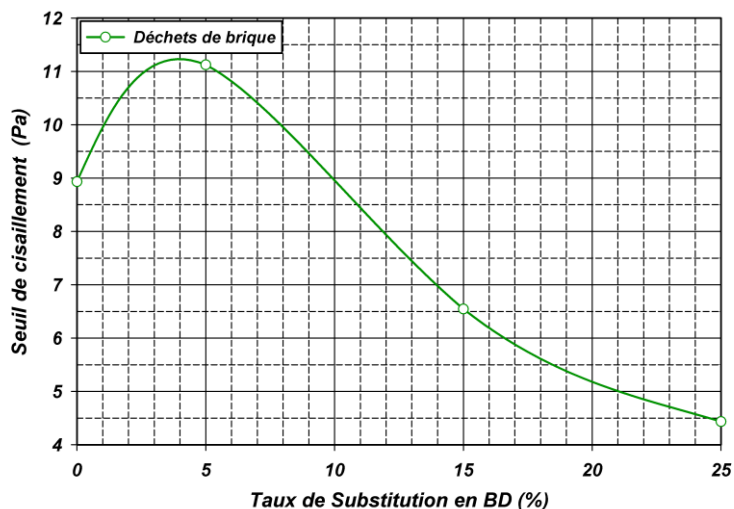


Figure 48. Influence de déchet de brique sur le seuil de cisaillement des mortiers autoplaçant.

c. Cas de metakaolin :

Pour connaître l'influence de metakaolin sur l'ouvrabilité du mortier autoplaçant à l'état frais nous avons étudié trois compositions (5MK, 10MK et 15MK) avec des taux de substitution de 5 ; 10 ; et 15% (Tableau 10). Notons que le dosage du superplastifiant est changé dans le cas de 15% de metakaolin de 1.2 à 1.3 par ce qu'on a trouvé que les résultats de l'étalement et V-funnel sont hors la gamme d'un mortier autoplaçant.

Tableau 10. Résultats de mortier autoplaçant binaire de metakaolin.

Substitution du ciment par metakaolin			
Mélange pour 1m ³	5MK	10MK	15MK
Metakaolin (%)	5	10	15
Ciment (g)	853	808.1	763.2
Metakaolin (g)	44.9	89.8	134.7
Sable en (g)	1690		
Eau (g)	361.90		361.55
SP (%)	1.2		1.3
SP (g)	10.77		11.22
Etalement (cm)	28.25	27.75	28.75
Temps d'écoulement (sec)	9.30	7.85	9.65
Viscosité (Pa.s)	6.93	8.10	8.08
Seuil de cisaillement (Pa)	4.22	14.90	11.23

c.1 Etalement :

L'effet de metakaolin sur l'étalement des mortiers est observé dans la figure 50. On remarque que l'ajout de metakaolin avec des pourcentages 5 ; 10% l'étalement de mortier diminuer, mais dans le cas de 15% de metakaolin l'étalement augmente puisque on a changé le dosage de superplastifiant de 1.2 à 1.3. On remarque aussi que l'augmentation du taux de substitution du ciment par le metakaolin conduit à une diminution de la l'ouvrabilité du mortier .On note ici que toutes les valeurs de l'étalement par le mini cône sont dans l'intervalle 28.25 à 28.75 cm, on remarque aussi une augmentation de seuil de cisaillement a généré la réduction de l'étalement alors mortier de base a metakaolin existant dans la gamme autoplaçant.

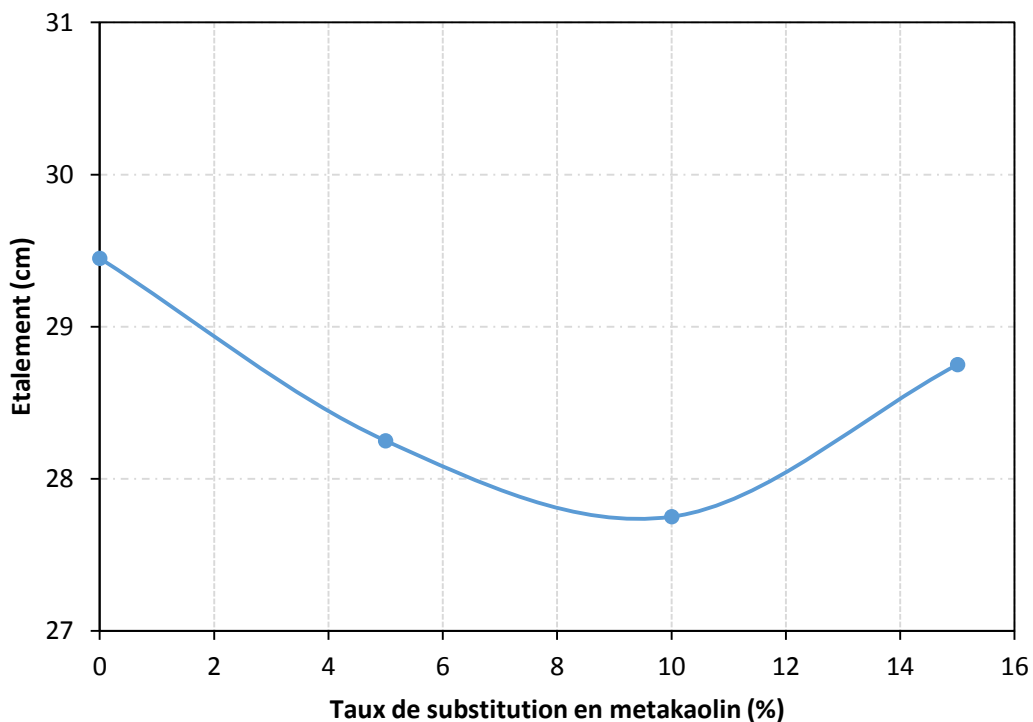


Figure 49. Effet de metakaolin sur l'étalement des mortiers autoplaçant.

c.2 Temps d'écoulement :

Les résultats de la variation du temps d'écoulement en fonction de différents pourcentages de metakaolin sont regroupés dans la figure 51. Elle montre que le temps d'écoulement augmenter en fonction du dosage en metakaolin de 9.3, 7.85, 9.65s par rapport au temps d'écoulement de mortier de référence qui égale 6.55s.

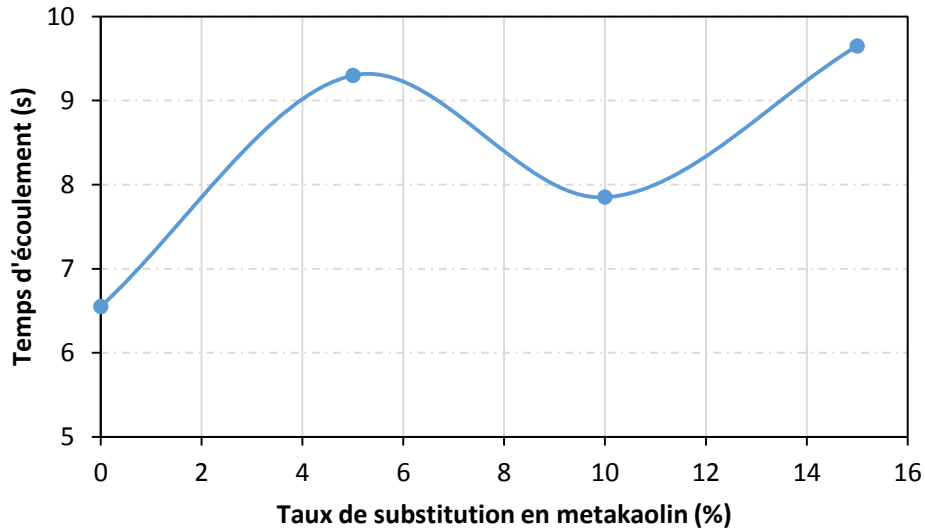


Figure 50. Variation de temps d'écoulement en fonction de la teneur en metakaolin

c.3 Mesure des paramètres rhéologiques :

L'influence de metakaolin sur les paramètres rhéologiques de mortier autoplaçant à base de metakaolin est montrée dans la figure 52.

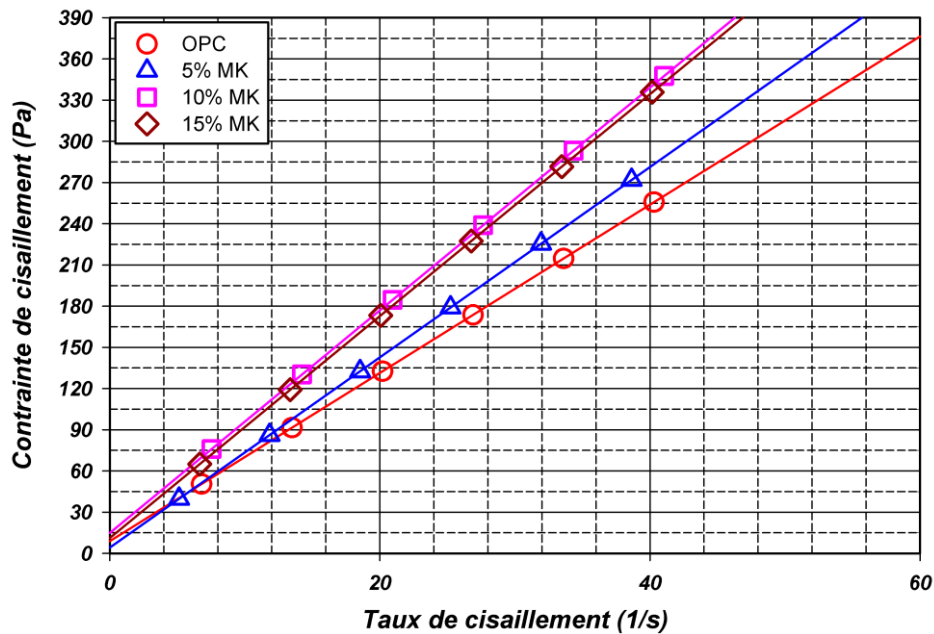


Figure 51. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier autoplaçant binaire (OPC, 5MK, 10MK, 15MK)

Les mortiers à base de metakaolin (5MK, 10MK, 15MK) augmente les propriétés rhéologiques (le seuil de cisaillement et la viscosité), cela est traduit par une augmentation de fluidité, ce résultat est dû principalement à l'augmentation de surface spécifique de liant par l'ajout de

metakaolin qui a une très grande finesse ($8332.68 \text{ cm}^2/\text{g}$), ainsi que l'absorption de l'eau et la consommation de superplastifiant par cette addition.

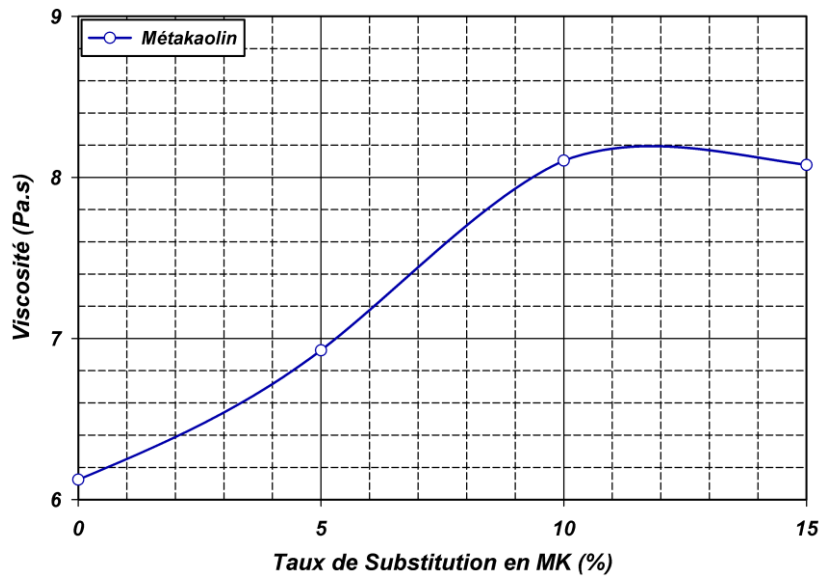


Figure 52. Influence de metakaolin sur la viscosité des mortiers autoplaçant.

D'après les figures (53 et 54) on constate que l'augmentation de la teneur en metakaolin augmente la viscosité et le seuil de cisaillement de 6.12 Pa.s et 8.98 Pa pour le mortier de référence jusqu'à un optimum de 8.10 Pa.s et 14.90 Pa pour le mortier 10MK. Cette augmentation conduit à un mélange ferme. Par ailleurs les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l'effet négatif de substitution de ciment par le metakaolin sur les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité) de mortier binaire.

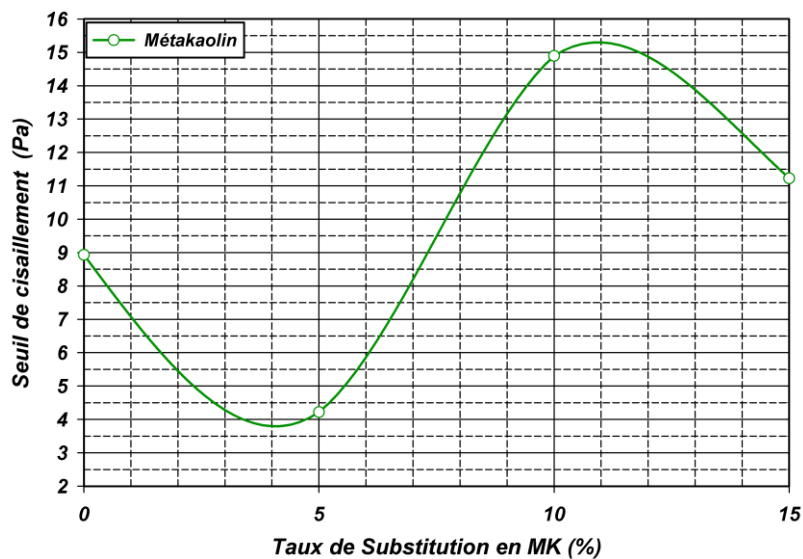


Figure 53. Influence de metakaolin sur le seuil de cisaillement des mortiers autoplaçant.

IV.2.3 Mortier de ciments ternaires:

Nous avons étudié des mortiers combiné le metakaolin, la poudre de marbre et déchet de brique en mélanges ternaires (15PM15DB, 15PM25DB, 15PM10MK, 15PM15MK) sur les caractéristiques des mortiers autoplaçant à l'état frais.

a. Cas des mélanges ternaires 15PM10MK, 15PM15MK :

Dans le tableau suivant, nous avons testé deux mélanges avec la fixation de pourcentage de poudre de marbre à 15% et on a varié la metakaolin de 10 et 15% (Tableau 11).

Tableau 11. Résultats de mortier autoplaçant ternaire de metakaolin avec poudre de marbre

Substitution du ciment par poudre de marbre et metakaolin		
Mélange pour 1m ³	15PM10MK	15PM15MK
Ciment (g)	673.4	628.5
Poudre de marbre (g)	134.7	134.7
Metakaolin (g)	89.8	134.7
Sable en (g)	1690	
Eau (g)	361.90	
SP (%)	1.2	
SP (g)	10.77	
Étalement (cm)	30.0	29.5
Temps d'écoulement (sec)	6.2	7.2
Viscosité (Pa.s)	6.63	7.80
Seuil de cisaillement (Pa)	12.65	17.94

a.1 Étalement :

La figure 55 présente l'effet du mortier ternaire (15PM10MK et 15PM15MK) sur l'étalement. Notons que le dosage superplastifiant est toujours constant à 1.2%.

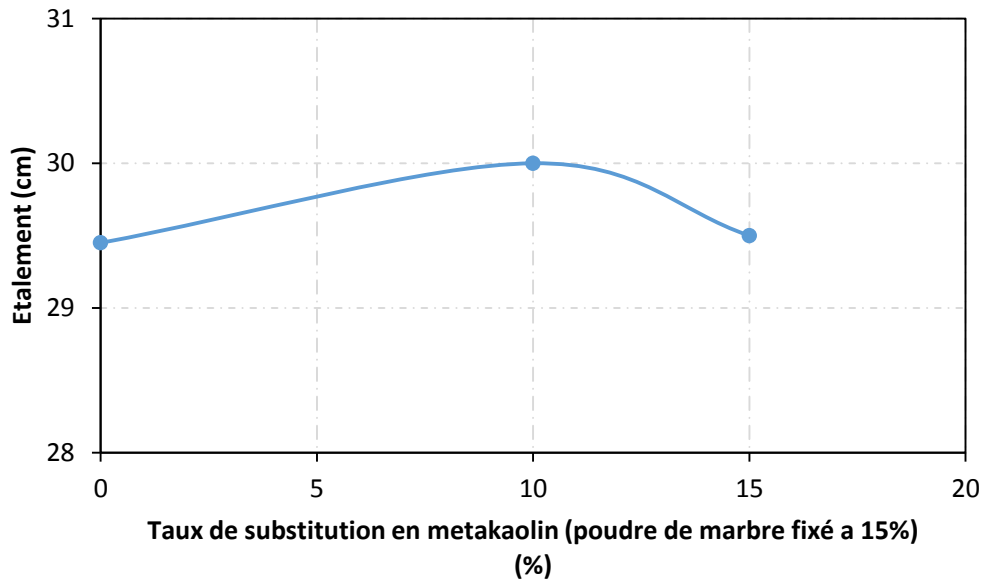


Figure 54. Effet de la combinaison de poudre de marbre avec le metakaolin sur l'étalement.

D'après la figure 55 on constate que le diamètre d'étalement diminue avec l'augmentation de la teneur en metakolin et augmente par rapport à celle de référence qui a une valeur de 29.45 cm. Les valeurs d'étalement comprises entre 30 à 29.5 cm pour les mélanges 15PM10MK et 15PM15MK respectivement. On notera cependant que le mortier 15PM10MK présente la valeur maximale d'étalement égal 30 cm, est dû à l'augmentation de la teneur en metakaolin. Donc l'effet de metakaolin est plus fort que l'effet de poudre de marbre à cause de la grande différence de finesse entre les deux additions.

a.2 Temps d'écoulement :

Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel) en fonction du pourcentage de poudre de marbre (15PM) et en metakaolin (10 et 15MK) sont représentés dans la figure 56.

La combinaison de poudre de marbre à 15% et le metakaolin à 10 et 15 %, a augmenté le temps d'écoulement et par conséquent la fluidité des mélanges diminue. Le temps d'écoulement varie de 6.2 à 7.2s. D'après les résultats obtenus, on constate une augmentation du temps d'écoulement par rapport à celui de mortier de référence, ajouter à cela nous avons remarqué que le temps de tous les mortiers autoplaçant est resté dans le domaine efficace ($T_e = 2$ à 10 s).

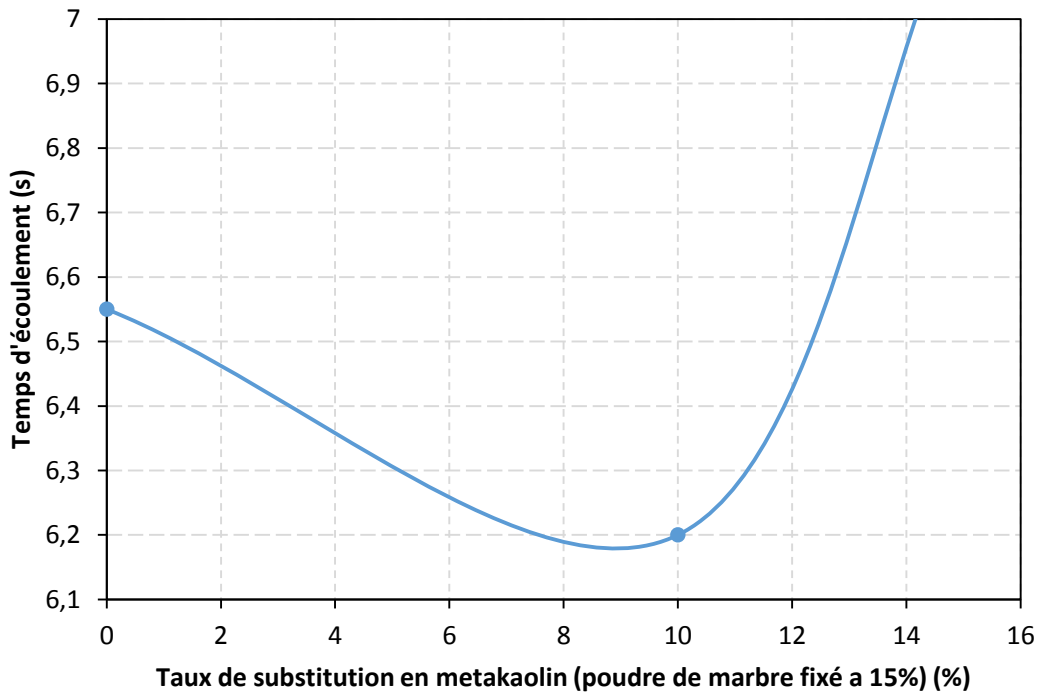


Figure 55. Effet de la combinaison poudre de marbre avec metakaolin sur le temps d'écoulement.

La substitution du ciment par la poudre de marbre (15%) et metakaolin à 10 et 15 %, a affecté négativement sur la fluidité des mortiers autoplaçant par rapport à celle du mortier binaire.

a.3 Mesure des paramètres rhéologiques :

Le mortier autoplaçant est caractérisé généralement par une fluidité élevée. L'évolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MAP en fonction de dosage de poudre de marbre avec metakaolin sont présentées dans la figure 57. Cette figure montre que la fluidité diminue avec l'augmentation de la teneur en metakaolin, puisque on note que les courbes de taux de cisaillement en fonction de contrainte de cisaillement des deux mélanges 15PM10MK et 15PM15MK sont supérieures à celle du mortier de référence (OPC).

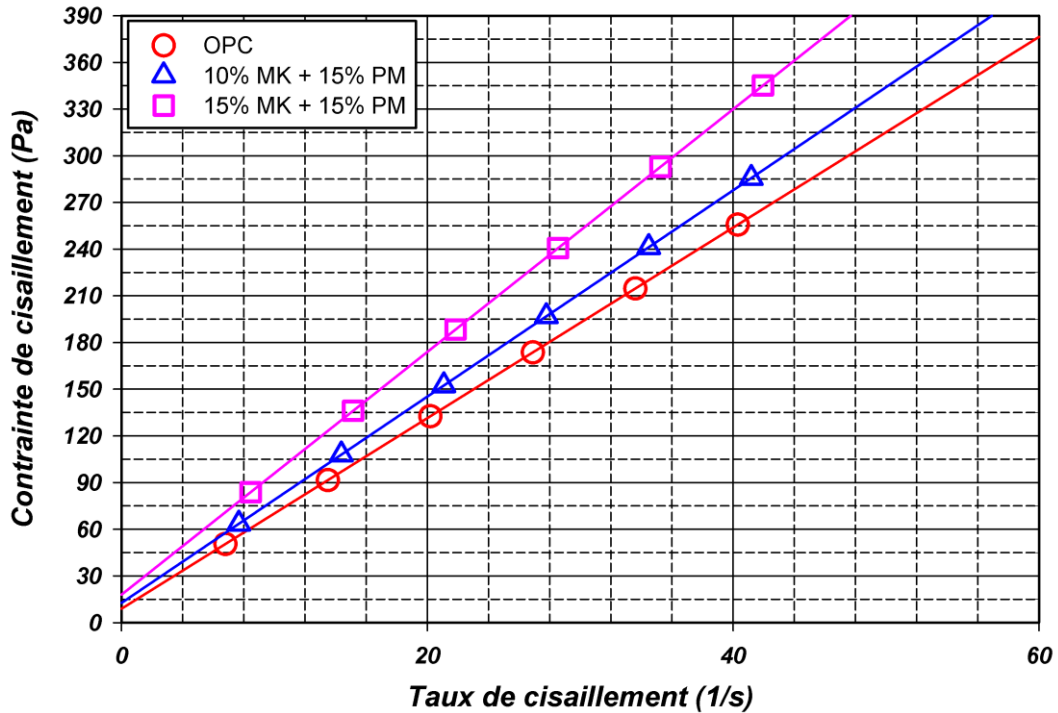


Figure 56. Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement du mortier autoplaçant ternaire (OPC, 15PM10MK et 15PM15MK).

L'évolution de la viscosité et le seuil de cisaillement des mortiers en fonction de dosage combiné de poudre de marbre avec metakaolin est présentée dans les figures (58 et 59). Ces figures montrent que l'ajout de metakaolin avec des pourcentages 10 et 15% avec 15% de poudre de marbre n'améliore pas la fluidité du mélange car une élévation de la viscosité (μ) et du seuil de cisaillement (τ_0) a été engendrée ainsi que l'augmentation du dosage de metakaolin jusqu'à 15%.

D'après les résultats présentés dans la figure ci-dessus, on constate que le metakaolin influe négativement sur la viscosité des mélanges et seuil de cisaillement, malgré la présence de la poudre de marbre dans ces mélanges. La viscosité des mortiers ternaires 15PM10MK et 15PM15MK augmente, mais par rapport le mélange de référence restent élevés.

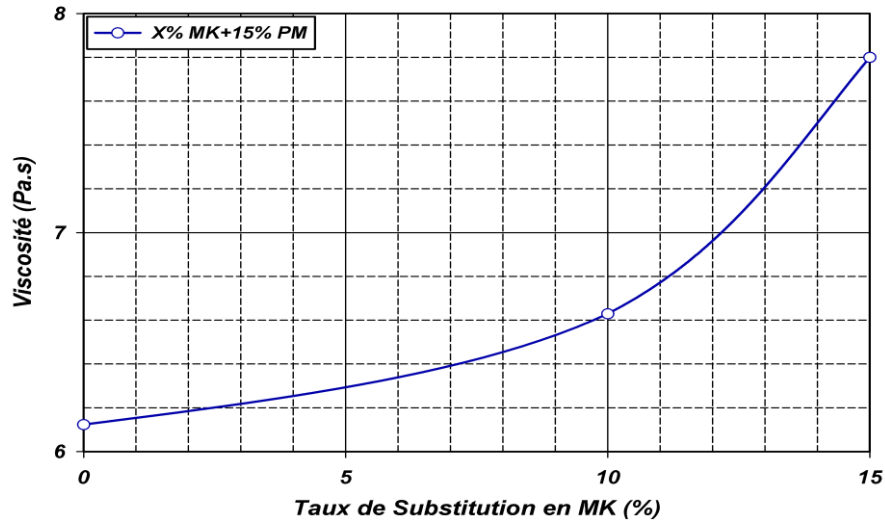


Figure 57. Évolution de la viscosité des mortiers ternaires base à la combinaison de poudre de marbre avec le metakaolin

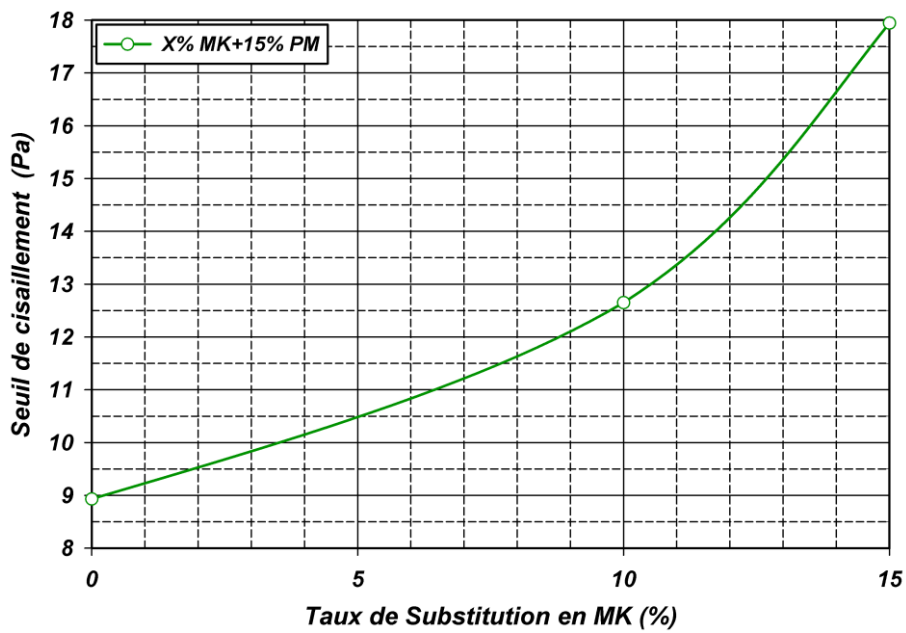


Figure 58. Evolution de seuil de cisaillement des mortiers ternaires base à la combinaison de poudre de marbre avec le metakaolin

b. Cas des mélanges ternaires 15PM15DB, 15PM25DB :

Afin d'évaluer les modifications induites par le déchet de brique sur le besoin en adjuvant. Nous avons testé deux compositions des mortiers autoplaçant confectionnés à base de ciment ternaire constitués de ciment et déchet de brique et poudre de marbre, avec un taux de substitution de ciment par déchet de brique variant entre 15 à 25% et 15% de poudre de marbre (Tableau 12).

Tableau 12. Résultats de mortier autoplaçant ternaire de poudre de marbre avec déchet de brique

Substitution du ciment par la poudre de marbre et déchet de brique		
Mélange pour 1m ³	15PM15DB	15PM25DB
Ciment (g)	628.5	538.7
Poudre de marbre (g)	134.7	134.7
Déchet de brique (g)	134.7	224.5
Sable en (g)	1690	
Eau (g)	361.90	
SP (%)	1.2	
SP (g)	10.77	
Étalement (cm)	31.15	30.7
Temps d'écoulement (sec)	5.7	5.95
Viscosité (Pa.s)	4.30	4.71
Seuil de cisaillement (Pa)	8.66	10.68

b.1 Étalement :

L'étalement du mortier ternaire confectionné par un taux de substitution de 15% et 25% de déchet de brique avec 15% de poudre de marbre est représenté dans la figure 60.

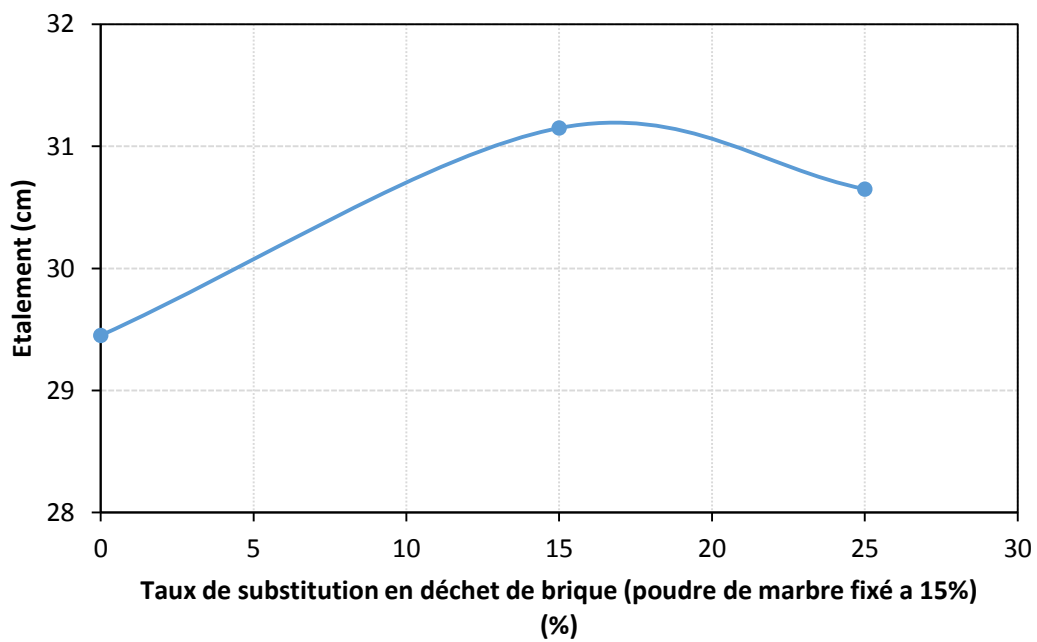


Figure 59. Effet de la combinaison poudre de marbre avec déchet de brique sur l'étalement.

La figure 60 montre que le diamètre d'étalement diminue avec l'augmentation de la teneur en ajouts. Mais augmente par rapport à celle de mortier de référence. Des valeurs d'étalement comprises entre 31.15 à 30.7cm ont été observées. On notera cependant que le mortier (15PM15DB) présente la valeur maximale d'étalement égal 31.15cm. Ça peut être à cause de la finesse de déchet de brique que est grand par rapport la finesse de poudre de marbre, est représenté bien quand on a augmenté la teneur en déchet de brique de 15% jusqu'à 25%. On observe aussi que l'augmentation de la quantité de déchet de brique affecte négativement sur l'ouvrabilité.

b.2 Temps d'écoulement :

L'évolution des temps d'écoulements des mortier autoplaçant à base des ciments ternaires en fonction de la teneur en poudre de marbre (15%) et déchet de brique (15 et 25%) est illustrée sur la figure 61.

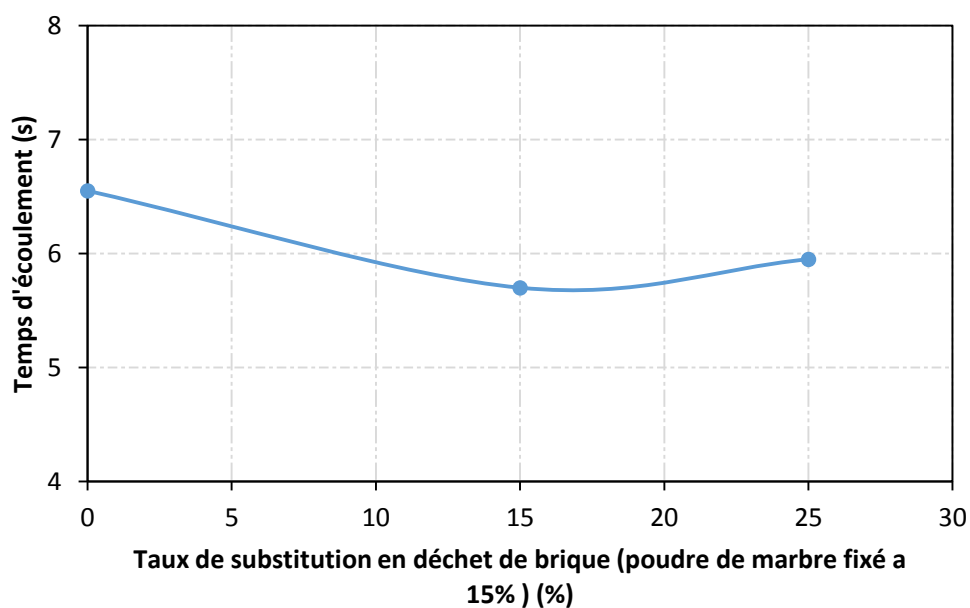


Figure 60. Effet de la combinaison poudre de marbre avec déchet de brique sur le temps d'écoulement.

D'après les résultats obtenus, on constate que le temps d'écoulement augmente par rapport à celui de mortier binaire à base de la poudre de marbre (15PM) mais encore moindre par rapport au mortier de référence, ajouter à cela nous avons remarqué que le temps de tous les mortiers autoplaçants sont reste dans le domaine efficace ($T_e = 2$ à 10 s).

b.3 Mesure des paramètres rhéologiques :

La figure 62 représente l'évolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant confectionnés à base de ciment ternaire composé de poudre de marbre 15% avec déchet de brique variés à 15% et 25%.

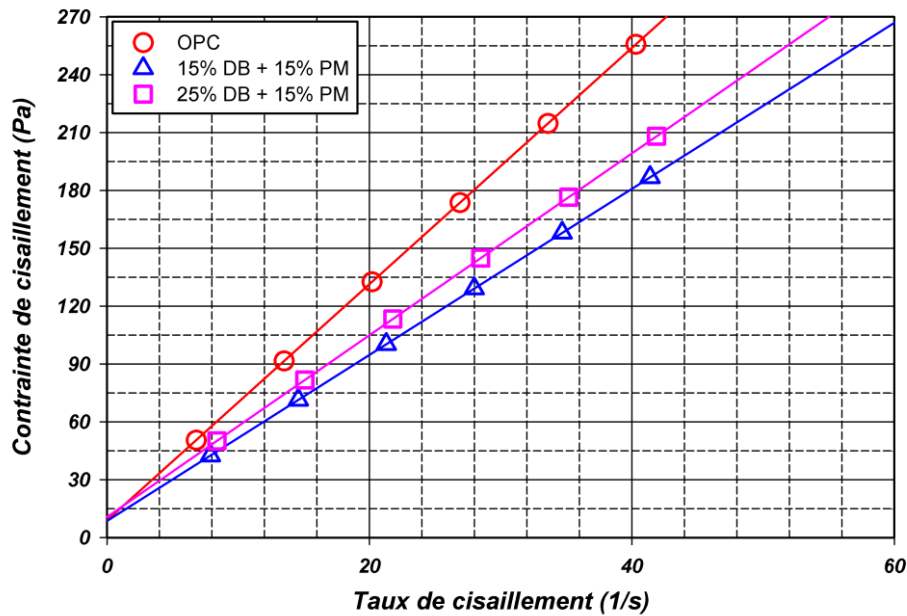


Figure 61. Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement du mortier autoplaçant ternaire (OPC, 15PM15DB et 15PM25DB)

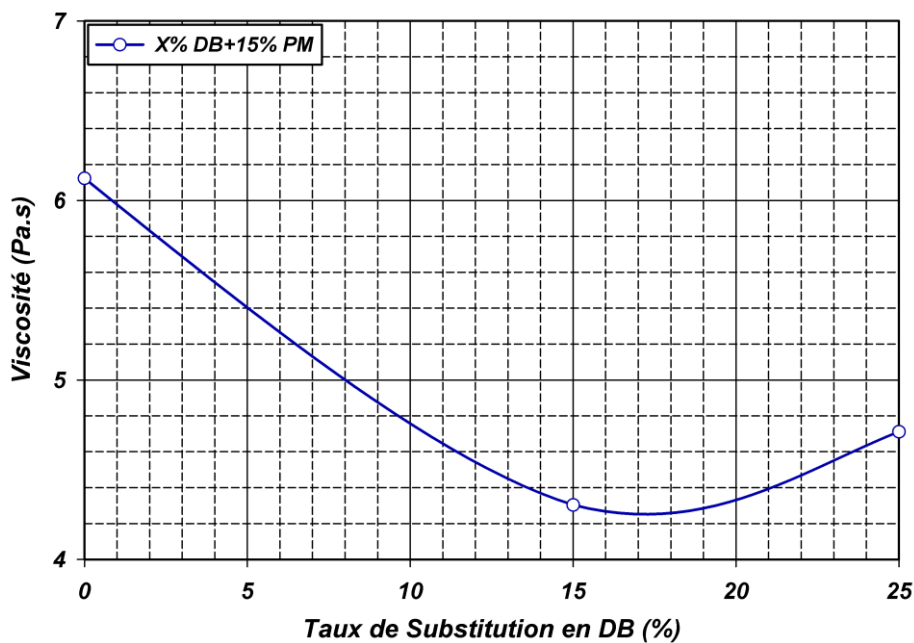


Figure 62. Évolution de la viscosité des mortiers ternaires base à la combinaison de poudre de marbre avec déchet de brique

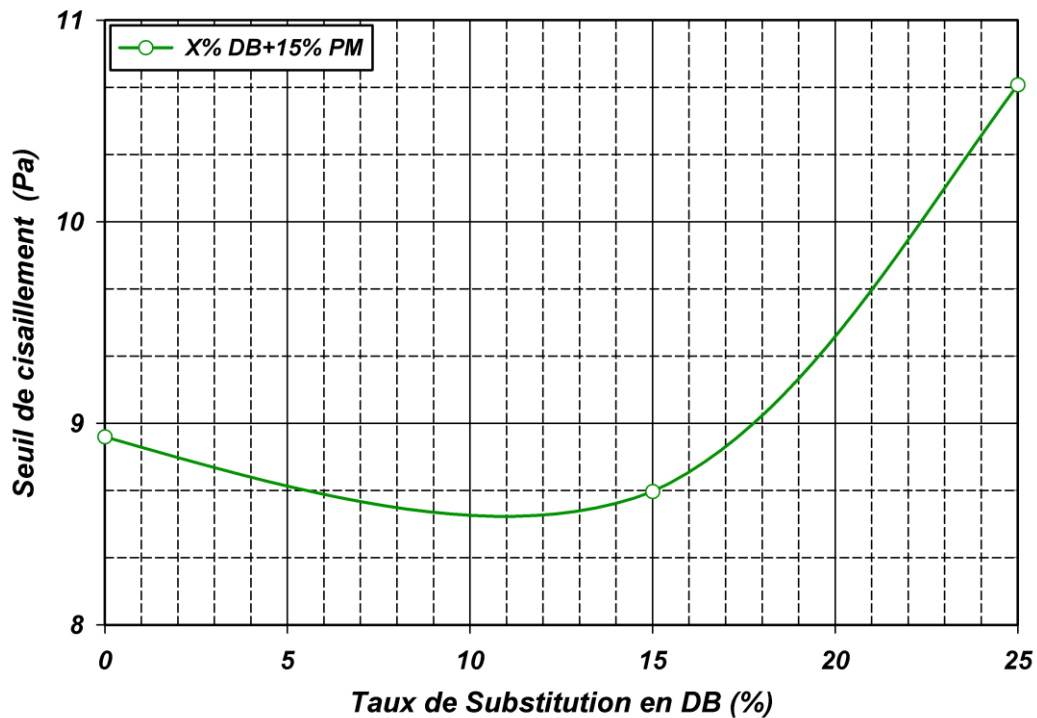


Figure 63. Evolution de seuil de cisaillement des mortiers ternaires base à la combinaison de poudre de marbre avec le déchet de brique

Les figures 62, 63 et 64 montres que les mélanges ternaires basent à la combinaison poudre de marbre avec déchet de brique provoque une diminution de seuil de cisaillement et de la viscosité avec 8.66Pa et 4.3Pa.s pour le mélange 15PM15DB et 10.68Pa et 4.71Pa.s pour le mélange 15PM25DB par rapport au mortier de référence qui a des valeurs de 8.93Pa et 6.12Pa.s. On note aussi que l'augmentation de teneur en déchet de brique dans les mélanges ternaires augmente la viscosité et seuil de cisaillement.

On peut constater que l'effet de combinaison poudre de marbre avec déchet de brique augmente lentement les paramètres rhéologiques, donc ces mortiers ternaires (15PM15DB et 15PM25DB) ont un effet négative.

IV.3 Essais effectués sur mortiers à l'état durci :

Nous présentons dans cette partie les résultats des différents essais effectués à l'état durci sur les mortiers confectionnées selon les différentes combinaisons d'ajout (metakaolin, déchet de brique et poudre de marbre).

IV.3.1 Résistance à la compression :

a. Effet de poudre de marbre:

Les résultats de résistance à la compression des mortiers autoplaçants binaire à base de poudre de marbre (5PM, 15PM et 25PM) sont résumés dans la figure 65 qui présente la variation de la résistance à la compression du mortier autoplaçant binaire aux différents âges 1, 7, 28 et 56 jours.

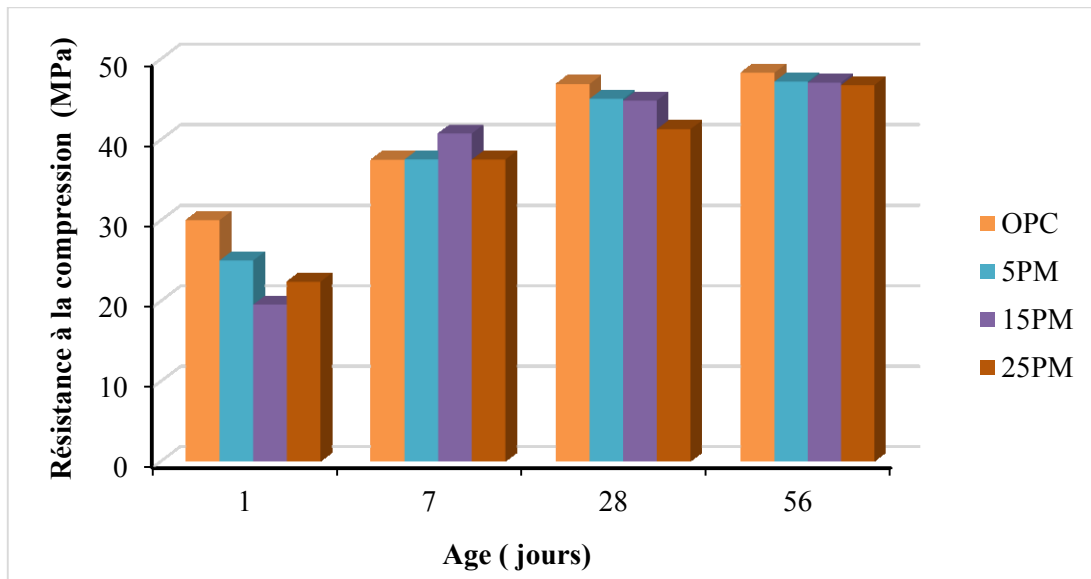


Figure 64. Evolution de résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant la poudre de marbre

Figure 65 montrent le développement de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers. On remarque que les résistances de tous les mortiers diminuent régulièrement avec l'augmentation du pourcentage en poudre de marbre. Les valeurs de résistance à la compression des mélanges OPC; 5PM; 15PM et 25PM, à 1 jours sont respectivement de 30.06; 25.05; 19.59; 22.42 MPa, concernons les résistances a 7 jours sont respectivement de 37.53 ; 37.57 ; 40.80 ; 37.57 MPa, est les valeurs sont respectivement de 46.92; 45.09; 44.88; 41.32 MPa, pour 28 jours, finalement de 48.33 ; 47.23 ; 47.09 ; 46.78 MPa après 56 jours. On note aussi que le mortier 5PM a une résistance à la compression plus élevé que les autre mortiers notamment a 7, 28 et 56 jours. Ceci est dû à la finesse de poudre de marbre qui jeu un rôle significative dans la continuité du la granulométrie de pate est par conséquence augmente la résistance à la compression des mortiers. Selon Belaidi A. S. E. [83] et Ouai A. et al. [82] ont montré que la substitution du ciment par de la poudre de marbre conduit à une diminution de la résistance à la compression, ce qui est en conformité avec nos résultats.

b. Effet de déchet de brique:

La figure 66 représente la variation de la résistance à la compression du mortier autoplaçant binaire à base de déchet de brique (5DB, 15DB et 25DB) aux différents âges 1, 7, 28 et 56 jours.

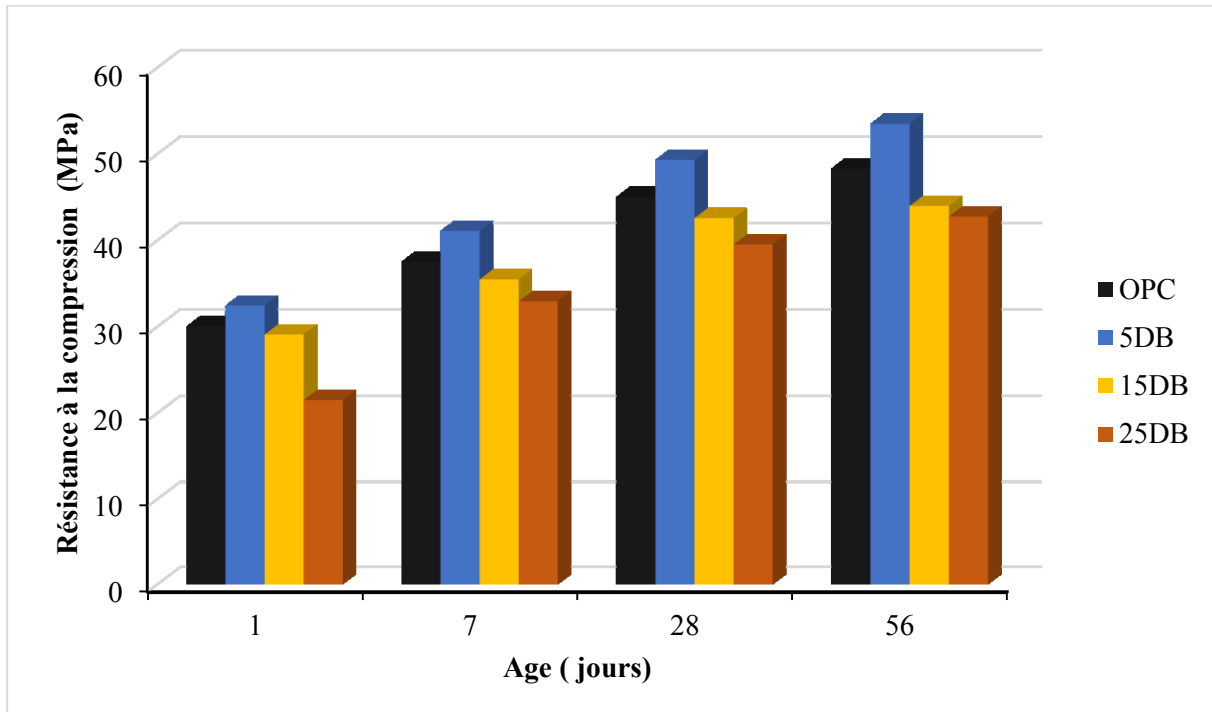


Figure 65. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant déchet de brique

D'après la figure précédant on constate que la résistance à la compression augmente à mesure que l'âge augmente. On remarque que la résistance diminue quand le pourcentage de DB augmente. On note aussi que le mortier 5DB est celui qui présente, pour tous les âges, les résistances les plus élevées 32.48 à 1 jour, 41.12 à 7 jours, 49.34 à 28 jours et 53.52MPa à 56 jours.

c. Effet de métakaolin :

La variation de la résistance à la compression du mortier autoplaçant binaire à base de métakaolin (5MK, 10MK et 15MK) aux différents âges 1, 7, 28 et 56 jours est représentée dans la figure 67.

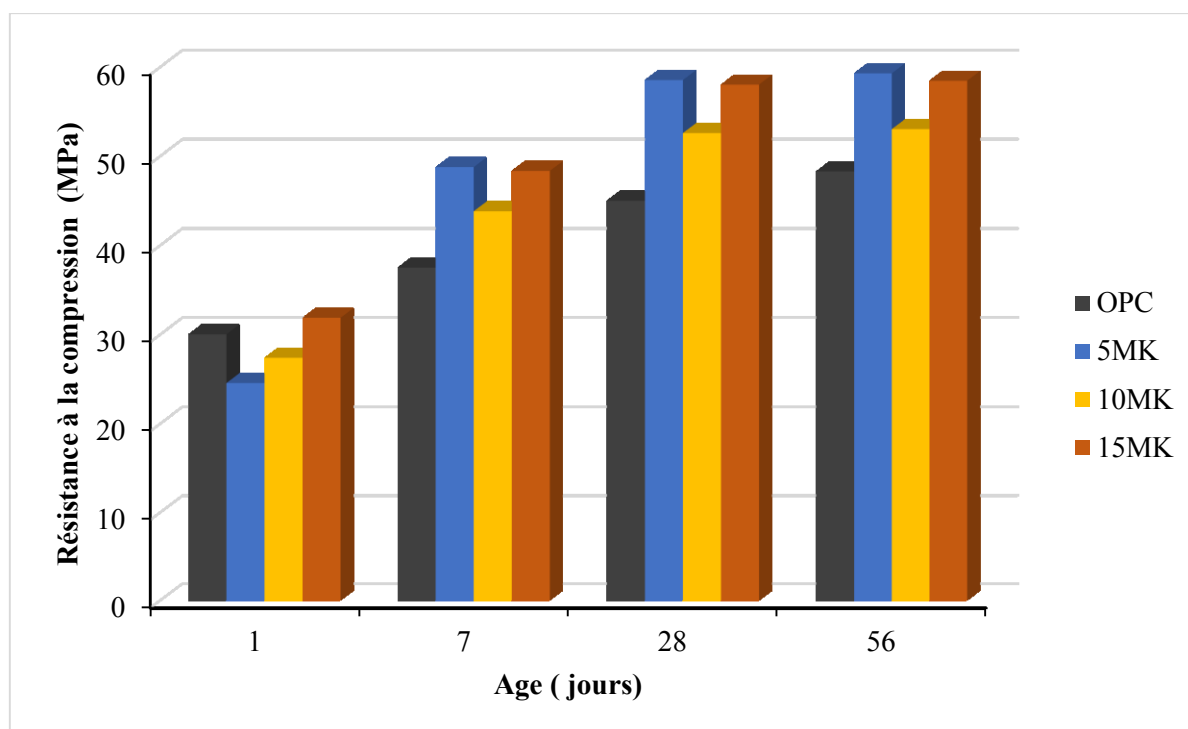


Figure 66. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant le métakaolin.

La figure 67 illustre l'influence de métakaolin sur la résistance à la compression des mortiers binaires à base de MK. D'après les résultats obtenus, on remarque une augmentation significative de la résistance à la compression de tous les mélanges. Les mélanges contenant 5, 10 et 15% de MK ont des résistances respectivement de 24.60, 27.43, 31.91 MPa à jeune âge. Cette augmentation continuée avec l'évolution de l'âge, on note aussi que la résistance de mélange de 5MK représente la plus grande valeur 59.33 MPa à 56 jours.

d. Effet de la combinaison de poudre de marbre avec déchet de brique:

Il est clairement que les ajouts minéraux actifs ou inertes affectent l'état durci des mortiers autoplaçant, d'où leur effet sur la résistance à la compression des mortiers à l'âge 1, 7, 28 et 56 jours est représenté dans la figure 68.

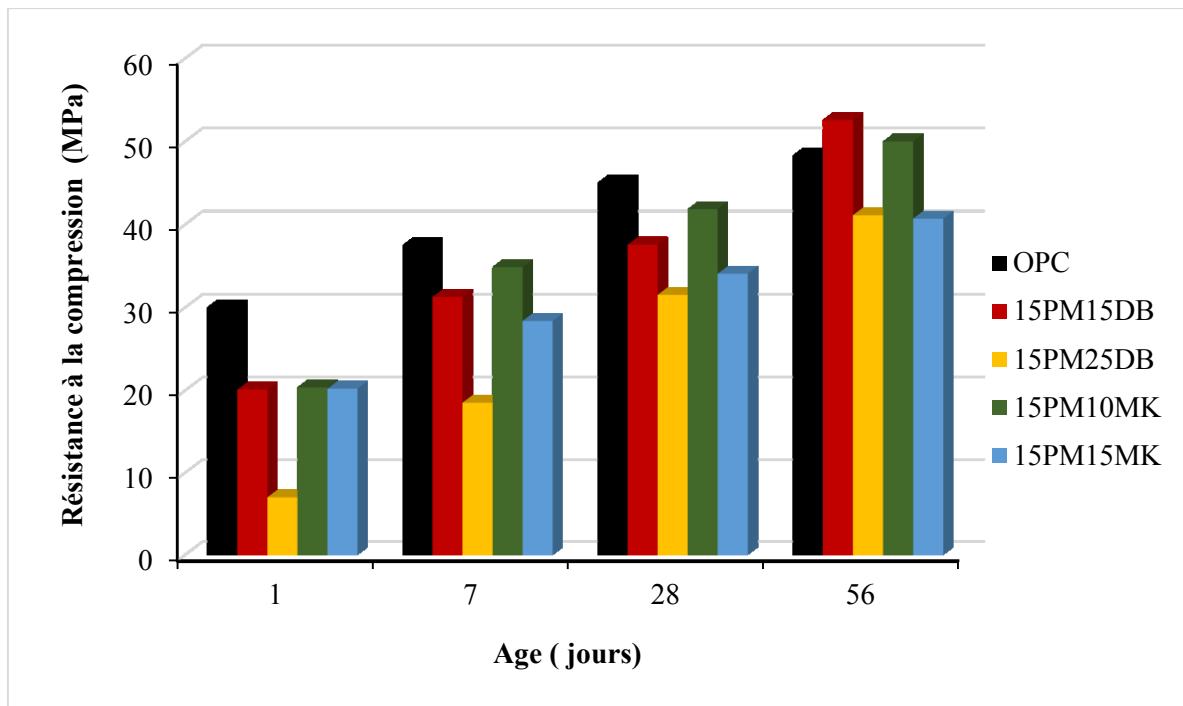


Figure 67. Effet de la combinaison 15PM15DB, 15PM25DB, 15PM10MK et 15PM15MK sur la résistance à la compression.

D'après les résultats obtenus dans la figure 68, on constate que la résistance à la compression augmente à fur et à mesure que l'âge augmente, cette augmentation de résistance est remarquable concernons le mélange 15PM25DB qui a des valeurs de 7.04, 18.56, 31.55 et 41.15 MPa a 1, 7, 28 et 56 jours respectivement. On note aussi que le mortier 15PM15DB à la valeur de résistance le plus grand 52.61 MPa après 56 jours.

Nous concluons par les résultats des essais de résistance à la compression réalise sur le mortier autoplacant binaire et ternaire que la nature et le taux des additions influent sur la résistance soit à long terme ou à jeun âge positivement ou négativement ca dépende de l'addition minérale utilisé.

IV.3.2 Vitesse de propagation d'ondes:

a. Mélanges binaires :

a.1 Cas de poudre de marbre :

Les valeurs de la vitesse de propagation d'onde des différents mélanges comportant différente teneur en poudre de marbre pour 28 et 56 jours sont présentées sur la figure 69.

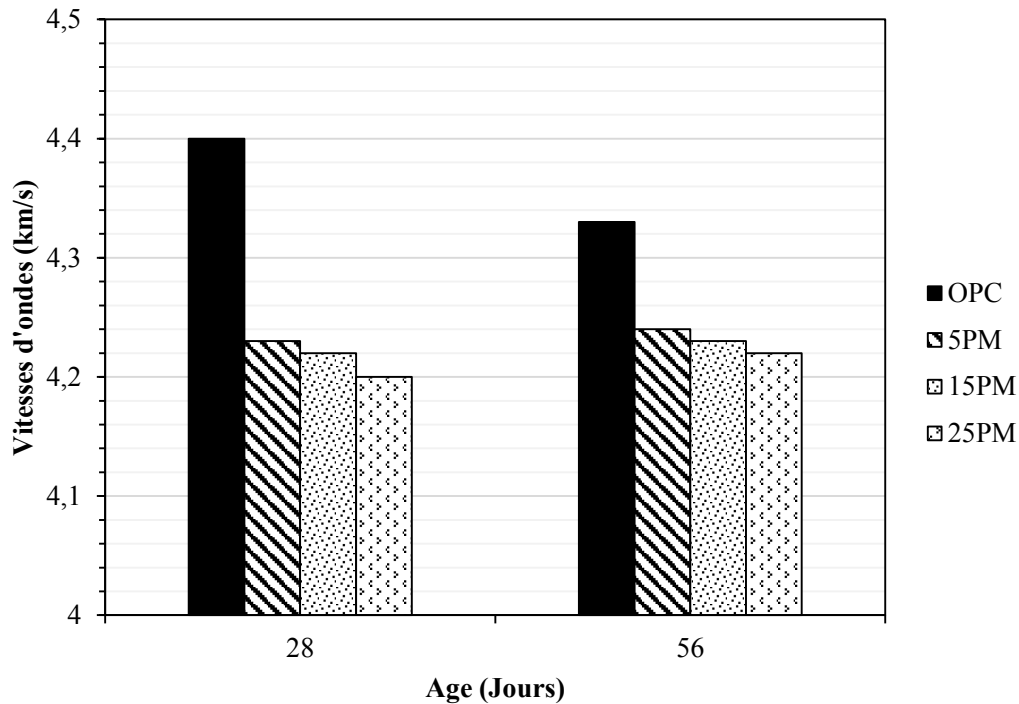


Figure 68. Évolution des vitesses de propagation d’ondes avec l’âge des mélanges à base de poudre de marbre.

D’après ces valeurs, on constate, pour tous les deux âges (28 et 56 jour) ont une diminution des vitesses de propagation d’ondes (VPO) avec l’accroissement de la teneur en poudre de marbre. On remarque aussi que la composition de référence est celle qui présente à tous les âges, les vitesses les plus élevées. La VPO des mélanges OPC; 5PM; 15PM et 25PM, à 28 jours sont respectivement de 4.40; 4.23; 4.22; 4.20 km/s, est les valeurs sont respectivement de 4.33; 4.24; 4.23; 4.23 km/s, pour 56 jours. La diminution des VPOs avec l’augmentation de la teneur en PM peut être expliquée par la diminution de la densité des mélanges.

Topçu et al [98] ont rapporté que l’augmentation de la quantité de PM substituée mène à une diminution de la VPO, ce qui est en accord avec nos résultats.

a.2 Cas de metakaolin :

La figure 70 montre les valeurs de la vitesse de propagation d’ondes pour 28 et 56 jours des différents mélanges comportant différente teneur en metakaolin.

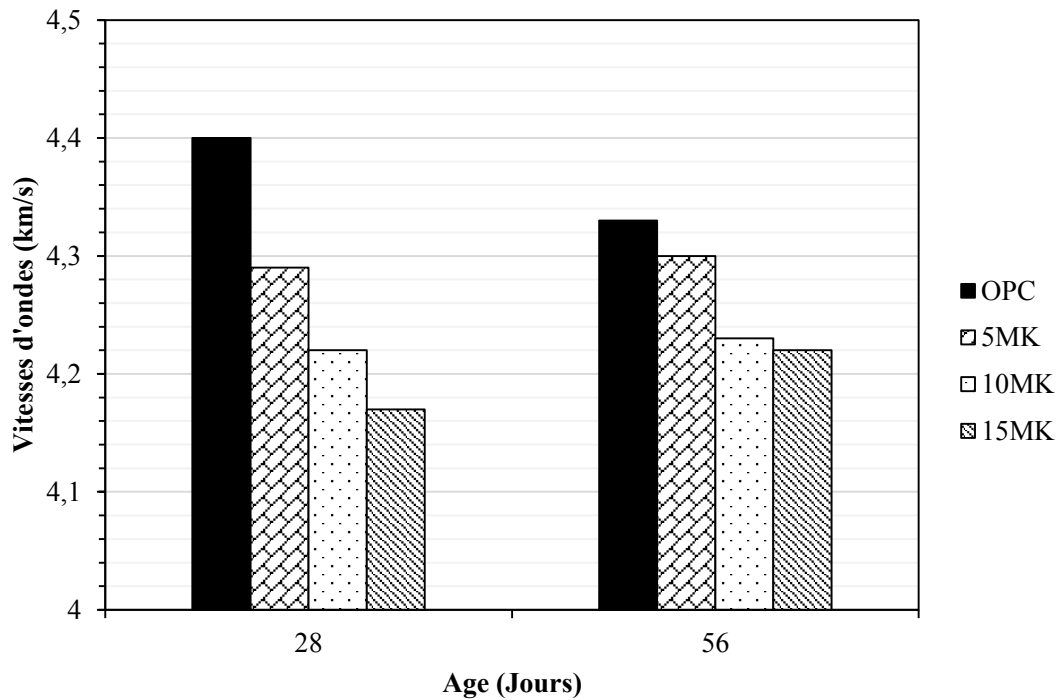


Figure 69. Évolution des vitesses de propagation d’ondes avec l’âge des mélanges à base de metakaolin.

D’après la figure 70 on remarque que la vitesse de propagation d’onde diminue avec l’augmentation de la teneur en metakaolin de 4.29 à 4.17 km/s pour 5MK à 15MK dans 28 jours, et de 4.30 à 4.22 km/s pour 5MK à 15MK dans 56 jours. La diminution des VPO’s avec l’augmentation de la teneur en MK peut être expliquée par la forte activité de metakaolin.

De nombreux chercheurs [30, 91, 92, 99] ont rapporté que l’utilisation des ajouts minéraux conduit à une diminution de la VPO des BAP.

a.3 Cas de déchet de brique :

La figure 74 représente l’évolution de la vitesse de propagation d’onde en fonction de l’Age du mortier autoplaçant à base de déchet de brique.

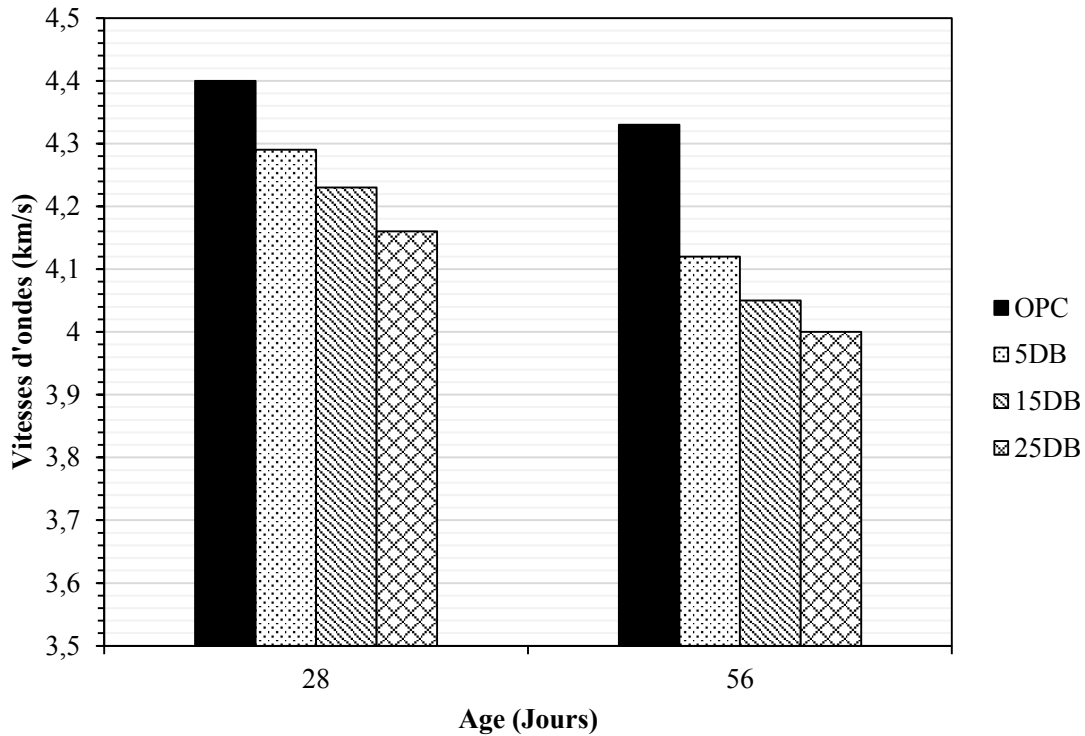


Figure 70. Évolution des vitesses de propagation d’ondes avec l’âge des mélanges à base de déchet de brique.

La figure 71 montre que tous les valeurs d’VPO des mélanges à base de déchet de brique sont inférieures à celle de mortier de référence soit à 28 ou 56 jours. Avec des valeurs de 4.29 à 4.16 pour 5DB à 25DB dans 28 jours et de 4.12 à 4 pour 5DB à 25DB pendant 56 jours Ce qui implique l’utilité d’utilisation de déchet de brique pour diminuer les ports intérieur des mélanges, est par conséquent augmente la résistance mécanique a 28 jour ou à long terme.

b. Mélanges ternaires :

b.1 Cas de poudre de marbre avec déchet de brique :

Les résultats de variation de la vitesse de propagation d’one des mélanges ternaire de poudre de marbre avec déchet de brique sont représentés dans la figure 72.

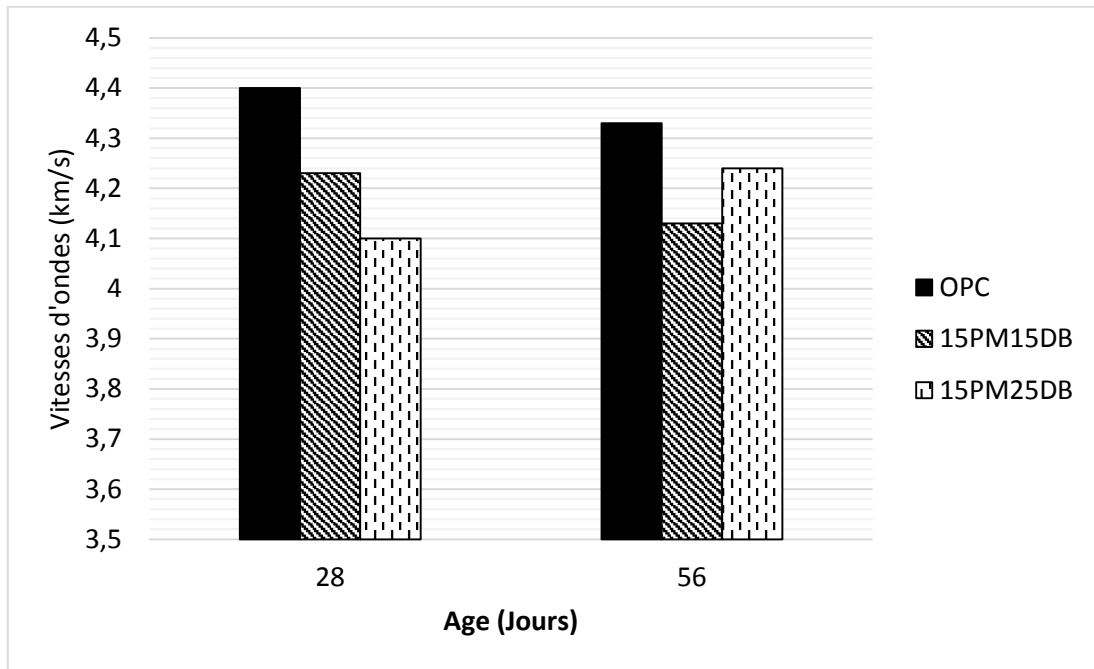


Figure 71. Évolution des vitesses de propagation d’ondes avec l’âge des mélanges ternaire de poudre de marbre avec déchet de brique.

On voit bien que l’augmentation de la quantité de déchet de brique de 15% jusqu’à 25% avec des quantités de poudre de marbre fixé à 15% décroît la vitesse de propagation d’onde de 4.23 à 4.10 km/s dans 28 jour, mais accroît à 56 jour de 4.13 à 4.24 km/s. Donc l’introduction de déchet de brique jusqu’à 25% avec 15% de poudre de marbre améliore le squelette intérieur de mortier autoplacant à 28 jours, mais à 56 jours cette introduction de déchet de brique avec la poudre de marbre aggrave la forme intérieure de mortier autoplacant. Ça peut être expliqué par l’activité de déchet de brique à 28 jours, mais à 56 jours cette activité diminue donc la vitesse de propagation d’onde augmente.

b.2 Cas de poudre de marbre avec metakaolin :

La figure 73 montre l’évolution de vitesse de propagation d’onde du mortier ternaire contenant la poudre de marbre et du metakaolin.

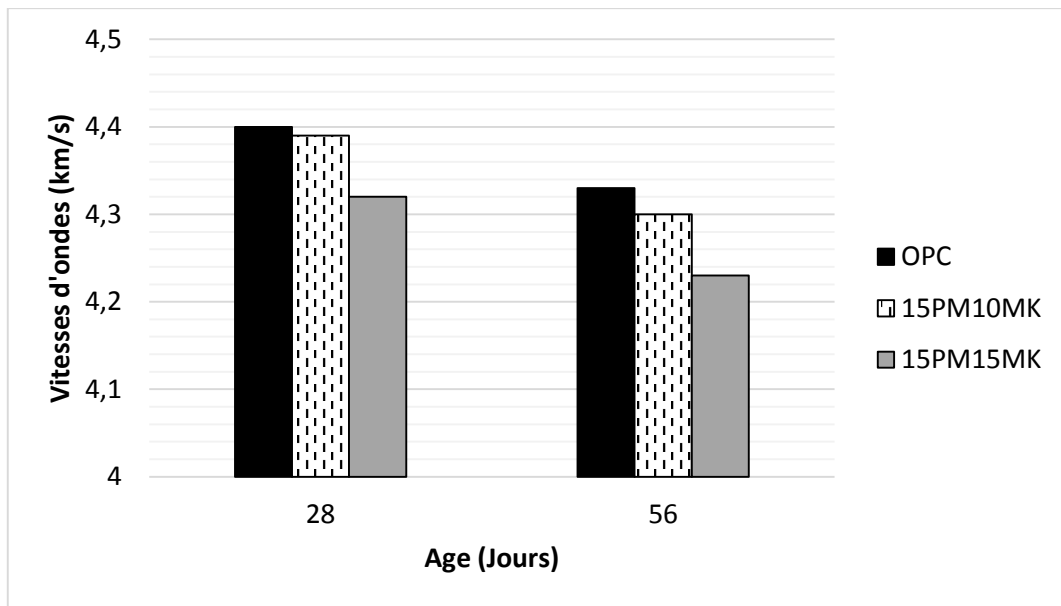


Figure 72. Évolution des vitesses de propagation d’ondes avec l’âge des mélanges ternaire de poudre de marbre avec metakaolin.

Cette figure montre que l’ajout de metakaolin à 10% ; 15% avec 15% de poudre de marbre fixé conduit à une diminution légère de VPO de 4.39 à 4.32 km/s par rapport à celle de mortier de référence qui a une valeur de 4.40 km/s à 28 jours, et des valeurs de 4.30 à 4.23 km/s par rapport à 4.33 km/s pour le mortier de référence à 56 jours. Ça possible à cause de la fort activité de métakaolin soit à 28 ou 56 jours.

Whitehurst [100] a classifié les bétons selon leur qualité comme suit : excellente, bonne, modérée, mauvaise et très mauvaise pour des VPO’s de 4.5 et plus, 3.5÷4.5, 3÷3.5, 2÷3 et ≤ 2 km/s. Cette classification indique que toutes les compositions testées dans notre travail ont d’une bonne qualité.

IV.3.3 Absorption d’eau par immersion :

a. Mélanges binaires :

Tableau 13. Coefficient d’absorption de différents mélanges binaires

Mélange	100C	5PM	15PM	25PM	5DB	15DB	25DB	5MK	10MK	15MK
Coefficient D’absorption (%)	8.77	8.45	8.53	8.93	8.16	8.61	8.62	8.63	9.29	9.49

Les résultats issus de l'essai d'absorption par immersion des mélanges binaires sont illustrés sur le tableau 13. Il est clair d'après les valeurs obtenues que les mélanges 5PM; 15PM et 25PM ont une augmentation du taux d'absorption respectivement de 8.45; 8.53 et 8.93%. Et les mélanges 5DB ; 15DB et 25DB ont une augmentation aussi du taux d'absorption de 8.16; 8.61 et 8.62% respectivement. Et finalement concernant les mélanges 5MK ; 10MK et 15MK ont une augmentation aussi du taux d'absorption de 8.63; 9.29 et 9.49%. cette augmentation est possible due à la grande finesse des ajouts minérales qui cause une grande demande d'eau.

b. Mélanges ternaires :

Tableau 14. Coefficient d'absorption de différents mélanges ternaires

Mélanges	15PM15DB	15PM25DB	15PM10MK	15PM15MK
Coefficient				
D'absorption	8.97	9.20	8.93	9.07
(%)				

A travers le tableau 14 on remarque que les valeurs d'absorption par immersion des couples ternaire 15PM15DB, 15PM25DB, 15PM10MK et 15PM15MK sont respectivement 8.97 ; 9.20 ; 8.93 et 9.07%. Ces valeurs augmentent par rapport à celle de mortier de référence qui a une valeur de 8.77%. D'après ces résultats on peut conclure que plus le taux de substitution des ajouts est élevé plus le taux d'absorption est grand.

Conclusion:

Les résultats de cette étude expérimentale montrent que l'utilisation de poudre de marbre, mé-takaolin et déchet de brique comme des additions minérales dans le MAP est très avantageux aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. La substitution du ciment par les additions aux une conséquence bénéfique sur les propriétés du MAP à l'état frais telle que l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques. À l'état durci, les additions (PM, DB, MK) dans la composition de MAP conduit d'une part à une diminution de la vitesse de propagation d'ondes, et d'autre part à une augmentation de l'absorption de l'eau par immersion. Du point de vue de durabilité et concernons la résistance à la compression, l'introduction de ces additions (PM, DB et MK) en terme générale augmente la résistance surtout à long terme.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail de recherche est d'examiner l'effet de la substitution du ciment par des additions minérales soit la poudre de marbre (PM), metakaolin (MK) et déchet de brique (DB) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers autoplaçants (MAP). Le ciment Portland Ordinaire (OPC) a été partiellement remplacé par différents pourcentages de poudre de marbre (5 ; 15 ; 25%), de metakaolin (5 ; 10 ; 15%) et déchet de brique (5 ; 15 ; 25%).

Les différents essais réalisés tel que l'essai d'étalement, l'essai de temps d'écoulement de V-funnel, d'absorption par immersion, les essais au rhéomètre et l'essai ultrasonique, ont permis d'une part de mettre en évidence le comportement à l'état frais des mortiers autoplaçants et d'autre part de confirmer les possibilités d'élaborer des MAP's à base des matériaux locaux en particulier la poudre de marbre, metakaolin et déchet de brique.

Les ensembles des résultats obtenus dans cette étude permettant de tirer les conclusions suivantes :

- à l'état frais :
- L'incorporation de la poudre de marbre avec un taux variable influe positivement sur les propriétés rhéologiques en diminution de seuil de cisaillement et la viscosité, Ainsi s'explique que l'ouvrabilité élève mesuré à l'aide de l'essai d'étalement. Notons que le dosage en superplastifiant reste constant pour tous les mortiers.
- L'utilisation de déchet de brique avec un taux variable affecte positivement sur les propriétés rhéologiques en diminution de seuil de cisaillement et la viscosité. Ces mortiers présentent des valeurs d'étalement qui varie entre 29.6 à 31.75 cm. Notons que le dosage en superplastifiant a été modifié dans le cas de taux substitution 25 % puisque on a trouvé que les résultats de l'étalement et v-funnel sont hors la gamme d'un mortier autoplaçant.
- La substitution du ciment par du metakaolin dans le ciment avec un taux variant entre 5 à 15% affecte négativement les propriétés rhéologiques qui augmente le seuil de cisaillement et la viscosité. Ces mortiers présentent des valeurs d'étalement qui varie entre 28.25 à 28.75 cm. Notons que le dosage en superplastifiant a été modifié dans le cas de taux de substitution 15 % puisque le mélange ne représente plus un mortier autoplaçant
- L'augmentation du dosage en superplastifiant de 1.2 à 1.3% conduit à une augmentation de la déformabilité aussi bien que amélioration de comportement rhéologique du mortier autoplaçant binaire.

- La combinaison poudre de marbre et déchet de brique améliore le comportement rhéologique des mélanges ternaires (dont le seuil de cisaillement et la viscosité sont réduits).
- Le mortier autoplaçant 15PM10MK, est caractérisé par une fluidité élevée. Par conséquent il en résulte une diminution légère des propriétés rhéologiques.
- La substitution du ciment par la poudre de marbre à 15% et déchet de brique à 15% et 25% augmente la fluidité et le comportement rhéologique des mortiers autoplaçants à l'exception du mortier 15PM15DB qui a une fluidité plus que les autres.
- La substitution du ciment par la poudre de marbre à 15% et métakaolin à 10% et 15% affecte négativement la fluidité et le comportement rhéologique des mortiers autoplaçants.
- à l'état durci :
 - L'augmentation des teneurs en poudre de marbre conduit à une diminution de la résistance à la compression des mortiers autoplaçants.
 - La résistance à la compression des mortiers binaires à base de déchet de brique augmente significativement à long terme,
 - La résistance à la compression pour les mortiers ternaires est augmentée mais lentement à jeune âge, cependant ce dernier semble être plus efficace à 28 et 56 jours, ceci dû au taux de substitution élevé assuré par ce système et à l'activité pouzzolanique de ces additions.
 - La résistance à la compression des mortiers binaires à base de métakaolin augmente beaucoup plus à long terme,
 - L'augmentation de la quantité de PM substituée mène à une diminution de la VPO. On remarque que la composition de référence est celle qui présente, à tous les âges, les vitesses les plus élevées.
 - La vitesse de propagation d'onde diminue avec l'augmentation de la teneur en métakaolin de 4.29 à 4.17 km/s pour 5MK à 15MK dans 28 jours, et de 4.44 à 4.22 km/s pour 5MK à 15MK dans 56 jours. On note aussi que la VPO de 5MK est plus grande que celle du mortier de référence à 56 jours.
 - Les valeurs de VPO des mélanges à base de déchet de brique sont inférieures à celle du mortier de référence soit à 28 ou 56 jours.
 - L'augmentation de la quantité de déchet de brique de 15% jusqu'à 25% avec des quantités de poudre de marbre fixées à 15% réduit la vitesse de propagation d'onde de 4.23 à 4.10 km/s à 28 jours, mais les valeurs augmentent à 56 jours de 4.13 à 4.44 km/s. mais

quand on augmente la quantité de metakaolin a 10% ; 15% avec 15% de poudre de marbre fixé conduit à une diminution légère de VPO par rapport à celle de mortier de référence.

- L'augmentation de la quantité des ajouts substituée conduit à une augmentation de l'absorption d'eau. Plus le taux de substitution des ajouts est élevé plus le taux d'absorption est grand dans tous les mélanges.

Recommandations

Etant donné que ce travail a été réalisé dans une durée limitée, l'étude de l'effet de la poudre de marbre, déchet de brique et metakaolin sur les propriétés du mortier autoplaçant à l'état frais et durci a été aussi limitée à quelques paramètres. Pour cela, nous proposons aux futurs étudiants ou chercheurs de mener un travail sur l'effet de la poudre de marbre, déchet de brique et metakaolin sur les propriétés des MAP à l'état frais et à l'état durci en faisant les essais suivants

1. Carbonatation ;
2. Module d'élasticité ;
3. Perméabilité ;
4. L'absorption par capillarité ;
5. Séchage – mouillage

Pour cela, nous suggérons aux futurs étudiants d'utiliser les mêmes additions mais avec des taux de substitutions plus grande et d'étudier leurs effets combinés sur les propriétés rhéologique, physico-mécanique et la durabilité des mortiers et béton autoplaçants.

References bibliographiques

- [1] Okamura.H et Ouchi, « Self-compacting concrete, Journal of advanced Concrete Technology», 2003, vol 1, n°1, pp 5-15.
- [2] K.H. Khayat. « Colloques sur les bétons autonivelants » Centre de Recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université LAVAL Québec 1er Novembre 1996.
- [3] Projet national de recherche CERIB,« Béton Autoplaçant BAP », France, Octobre 2001.
- [4] RAMACHANDRAN, V.S. Concrete Admixtures Properties, Science, and Technology'', 2nd, Noyes, Publications, Parkridge, NJ; (1995).
- [5] M. Lanez « Contribution à l'étude des bétons de poudres réactives » Thèse de magistère, USTHB 2005.
- [6] : Z. Abib « Formulation et caractérisation des Bétons Autoplaçants » Thèse de magistère, USTHB 2004.
- [7] R.fatima & S.hadjer « ETUDE REOLOGIQUE DE MORTIER AUTOPLACANT DE HAUTE PERFORMANCE » mémoire de master, Université ammar thelidji de laghouat 2015/2016
- [8] Courrazé G., Grossiord JL, “ Initiation à la rhéologie”, Tec& Doc, (2000).
- [9] M'hamed Adjoudj ,“effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton” thèse en cotutelle entre Université de Cergy-pontoise (France) et Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie) ,(2015).
- [10] : Joumana Yammine, “ rhéologie des bétons fluides a hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques. matériaux”, Ecole normale supérieure de Cachan ENS Cachan, (2007).
- [11] DADA EL-Hadja et LAMRI Nacira“ Etude rhéologique des mortiers autoplaçants à base des ajouts cimentaires quaternaires”. (Mémoire de MASTER) 2014/2015
- [12] H. Nicolas,“Rhéologie des pates granulaires”Paris 6- Pierre et marie curie, france”, (2006).
- [13] Liu, M, “Wider application of additions in self-compacting concrete “, Doctoral Thesis of University College London, UK, 2009.

- [14] Krachai, R.M., Bouabdallah, M.A., Abdelhadi, H., and Mamou, K, “ Influence de la pouz-zolane de Beni-Saf sur les performances mecaniques des betons autoplacants ”, First Interna-tional Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET, Oran, Algeria, 2009
- [15] De Larrard, F, “ Construire en beton. L’essentiel sur les materiaux ”, Presses de l’Ecole Nationale Ponts et Chaussées, France, 2002.
- [16] Carlswald, J., Emborg, M., Utsi, S., and Oberg, P, “Effects of constituents on the worka-bility and rheology of self-compacting concrete”, in: the Third International RILEM Sympo-sium on Self-Compacting Concrete. Wallevik OH, Nielsson I, editors, RILEM Publications S.A.R.L, Bagneux, France, 2003; 143-53.
- [17] Kurita, M., and Nomura, T, “ Highly-flowable steel fiber-reinforced concrete containing fly ash ”, in: Malhotra V.M. (Ed.), ACI 1999, Sp 178, 59-175.
- [18] Nawa, T., Izumi, T., and Edamatsu, Y, “ State-of-the-art report on materials and design of selfcompacting concrete ”, Proceedings of International Workshop on Self-Compacting Con-crete, ed K. Ozawa and K. Ouchi, Kochi University of Technology, Japan, August 1998
- [19] Kim, J.K., Han, S.H., Park, Y.D., Noh, J.H., Park, C.L., Kwon, Y.H., and Lee, S.G, “ Experimental research on the material properties of super flowing concrete ”, in: Bartos P.J.M., Marrs D.L. and Cleland D.J. (Eds.), Production Methods and Workability of Concrete, E&FN Spon, 1996, 271-84.
- [20] Bouzoubaa, N., and Lachemi, M, “Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: preliminary results”, Cement and Concrete Research 2001, 31: 413-20.
- [21] Oliveira, L.A.P., Jalali, S., Fernandes, J.M., et Torres, E, “ L’emploi de metakaolin dans la production de beton ecologiquement efficace ”, Materials and Structures 2005; 38 : 403-10.
- [22] Liu, J.N, “Strength and hydration of an activated alumino-silicate material”, Pennsylvania State University, USA, 1998.
- [23] The Concrete Society, BRE, “Technical report No.62 self-compacting concrete: a re-view”. Day RTU, Holton IX, editors, Camberley, UK, Concrete Society, Surrey GU17 9AB, UK, 2005.
- [24] Hassan, A.A.A., Lachemi, M., and Hossain, K.M.A, “ Effect of metakaolin on the rheol-ogy of selfconsolidating concrete ”, in K.H. Khayat and D. Feys (eds.), Design, Production and

Placement of Self-Consolidating Concrete, RILEM Bookseries 1, Proceedings of SCC, Montreal, Canada, 2010; 103-12.

[25] Caldarone, M.A., Gruber, K.A., and Burg, R.G, "High reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture", *Concrete International* 1994; 16(11): 37-40.

[26] Marsh, D, "An alternative to silica fume", *Concrete Production* 1994; 97(11): 24-30.

[27] Boukendakdji.O, " Etude de l'influence des parametres de formulation sur les proprietes d'un beton autoplacant : Optimisation des conditions operatoires ", These de doctorat de l'Universite Saad Dahleb de Blida, Algerie, 2010.

[28] Uysal, M., and Sumer, M, "Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures", *Construction and Building Materials* 2011; 25: 4112-20.

[29] Lachemi, M., Hossain, K.M., Lambros, V., and Bouzoubaa, N, "Development of cost-effective selfconsolidating concrete incorporating fly ash, slag cement, or viscosity-modifying admixtures", *ACI Materials Journal* 2003; 100(5): 419-25.

[30] Uysal, M., and Sumer, M, "Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures", *Construction and Building Materials* 2011; 25: 4112-20.

[31] Celik, M.Y., and Sabah, E, "Geological and technical characterization of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution", *Journal of Environmental Management* 2008; 87: 106–16.

[32] Malhotra VM., "Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gaz emissions", 8th CANMET/ACI International conference on recent advances in concrete technology, Montreal June 2006, 18p.

[33] Escalante-Garcia JI., Sharp JH., "The chemical composition and microstructure of hydration products in blended cements", *Cement and concrete composites*, vol. 26,2004,pp.967-76.

[34] Najimia M., Sobhani J., Ahmadi B., Shekarchi M., "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan", *Construction and building materials*, vol. 35,2012, pp.1023–33.

[35] Şahmaran M., Özkan N., Keskin SB., Uzal B., Yaman İÖ., Erdem TK., "Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts", *Cement and concrete research* , vol. 38(7),2008, pp.930 –7.

- [36] Ahmadi B., Shekarchi M., "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material", *Cement and concrete composites*, vol. 32(2), 2010, pp.134–41.
- [37] Boudchicha A "Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons" Thèse de doctorat de l'université de mentouri Constantine, 2007, 294 P.
- [38] Lange F., Mortel N., Rudert V., "Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties", *Cement and concrete research*, vol. 27, 1997, pp. 1481-88.
- [39] Ramachandran VS., Mortel N., Rudert V., "Concrete admixtures", Handbook, Properties, Science and Technology, Noyes Publication, Park Ridge, NJ, 1995.
- [40] Felekoglu B., Tosun K., Baradan B., Altun A., Uyulgan B., "The effect of fly ash and Limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self compacting repair mortars", *Cement and concrete research* , vol 36, 2006, pp.1719-26.
- [41] Duval R., Kadri EH., "Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes". *Cement and concrete research*, vol 28(4), 1998, pp. 533-47.
- [42] Buil M., Witier P., de Larrard F., Detrez M., Paillere AM., "Physicochemical mechanism of the action of the naphthalene sulfonate based superplasticizer on silica fume concretes" *Proceedings of the Second International Conference on Fly ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Madrid, ACI, SP91-46, vol 2, 1986, pp.959-971.
- [43] Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y., "Reological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ratio", *Cement and concrete research*, vol 35, 2005, pp. 532-9.
- [44] Bonavetti V., Donza H., Rahhal V., Irassar E., "Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement", *Cement and concrete research* , vol 30, 2000, pp. 703-8.
- [45] Menendez G., Bonavetti V., Irassar EF., "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag", *Cement and concrete composites*, vol 25, 2001, pp. 61–7.

- [46] Michel F., Pierard J., Courard L., Pollet V., "Influence of physic-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar" performances, Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC, p205-210, 3-5 September 2007, Ghent, Belgium.
- [47] Billberg P., "Fine mortar rheology in mix design of SCC". Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC, p47-58, 13-14 September 1999, Stockholm, Sweden.
- [48] Nehdi M., Mindess S., "Optimization of high strength limestone filler cement mortars". Cement and concrete research, vol 26(6), 1996, pp.883-93.
- [49] Esping O., "Effect of limestone filler BET (H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete", Cement and concrete research, vol 38, 2008, pp. 938-44.
- [50] El Hilali A., "Experimental study of the rheological behavior and self-compacting concrete (SCC): Influence of limestone and fine plant fibers". MSc thesis. France: University of Cergy Pontoise; 2009, p.183.
- [51] Park CK., Noh MH., Park TH., "Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures". Cement and concrete research, vol. 35,2005, pp.842-49.
- [52] Atzeni C., Massidda L., Sanna U., "Relationship between rheology and workability of cement mixes containing blast furnace slag". Silic Indus 1986; 1-2:5-9.
- [53] Wu X., Roy DM., "Slag cement utilization: rheological properties and related characterization". Cement and concrete research, vol 14(4), 1984, pp.521-8.
- [54] Bessa-Badreddine A., "Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers", Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, 2004, 236 p.
- [55] De Larard F., Moreau A., Buil M. Paillere AM., "Improvement of mortars and concretes really attributabl eto condensed sili ca fume". 2nd International conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans, Madrid vol 2, 1986, pp.959-71.
- [56] Chu Q., Bonnamy S., Van Damme H., "Surface and colloidal properties of silica fume in aqueous solution", Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Milwaukee, Wisconsin, USA, 1995, pp.719-740.

- [57] Dahl PA., Meland I. "Influence of different pozzolan types upon the effect of plastifying admixture", Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Trondheim, Norway, 1989, pp.689-711.
- [58] Nagele E., "The Zeta potential of cement part II: Effect of PH value", Cement and concrete research, vol 16, 1986, pp. 6853-63.
- [59] Ferraris CF., Obla KH., Hill R., "Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and Rheological properties of cementitious materials containing mineral concrete", Cement and concrete research, vol 31,2001,pp. 245-55.
- [60] Shi TY., Tanigawa Y., Mori H., Kurokawa Y., "A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste", Transactions of the Japan Concrete Institute , vol 20(2),1998,pp. 223–8.
- [61] Carlsward J., Emborg M., Utsi S., Oberg P., "Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete", Proceeding of the Third international RILEM conference on SCC, Island, Proceedings PRO 33, pp. 143-153,2003.
- [62] Aïtcin PC., "Les Superplastifiants : des Réducteurs d'eau pas comme les autres", Recueil de conférences présentées à l'Université de Sherbrooke, 1990.
- [63] Cyr M., Mouret M., "Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures : Consequences on self -Compacting Concrete design", Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Allemagne, 2003, pp. 241-255.
- [64] Gallias JL., Kara-Ali R., Bigas JP., "The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes", Cement and concrete research, vol 30(10), 2000, pp.1543–9.
- [65] Zhang X., Han J., "The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste", Cement and concrete research, vol. 30(5),:2000,pp. 827–30.
- [66] Kwan AKH., "Use of condensed silica fume for making high-strength self consolidating concrete", Canadian Journal of Civil Engineering, 27, 2000, pp. 620-7.
- [67] Beeralingegowda B., Gundakalle VD., "The effect of addition of limestone powder on the properties of self compacting concrete", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, vol 2(9), 2013, pp. 2319-53.

- [68] Shen J., Yurtdas I., Diagana C., Li A., "Mix-design method of self-compacting concretes for pre-cast industry". Canadian journal of civil engineering, vol 36 (9), 2009, pp.1459-69.
- [69] Kourounis S., Tsivilis S., Tsakiridis PE., Papadimitriou GD., Tsibouki Z., "Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag", Cement and concrete research, vol 37, 2007, pp.815–22.
- [70] Shafigh P., Jumaat MZ., Mahmud H., Alengaram UJ., "Oil palm shell lightweight concrete containing high volume ground granulated blast furnace slag", Construction and building materials, vol 40, 2013, pp.231–8.
- [71] Krachai RM., Bouabdallah MA., Abdelhadi H., Hamou K., "Influence de la pouzzolane de beni-saf sur les performances mecaniques des betons autoplaçants", 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) – October 12- 14, 2009.
- [72] Bellifa S., "Evolution de la porometrie des pates autoplaçantes" Universite abou bekr belkaid - tlemcen faculte de technologie departement de genie civil, memoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en génie civil, 2012, 75 p.
- [73] Sheinn AMM., Ho DWS., Tam CT., "Effects of particule shape on paste rheology of SCC", Proceeding of the Third International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Island, 2003, pp.233-39.
- [74] Saada R., Barrioulet M. et Legrand C., "Influence des fluidifiants sur les caractéristiques rhéologique des pâtes de ciments fillerisés". Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, I.N.S.A.-U.P.S. de Toulouse, France, 1990, 91-105p.
- [75] HARBI.R., 2009. Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de déchets de briques. Mémoire de Magister, Université 08Mai 45, Guelma, Algérie.
- [76] WILD.S, GAILUIS.A, SZWABOWSKI.J, and H.HANSEN. Water clay brick – A European of its effectiveness as a cement replacement materiel. Exploiting wastes in concrete. Proceedings of the international seminar held in Dundee 1999. Ed Ravinda K.Dhir, ISBN 0727728334.
- [77] Hamza S., Kadri EH., Ngo TT., Bouvet A., Cussigh F., Kenai S., "A new vane rheometer for fresh mortar: development and validation", Applied Rheology, vol 24(2), 2014 pp.225-94.

- [78] R. CHAID. “ Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux”. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006
- [79] P. Claude AITCIN, “ Liant hydraulique, GCI 710 ” Université de Sherbrooke Canada.
- [80] NF-EN 15-432 «Béton : Essai de retrait » AFNOR Paris 1981.
- [81] A. Boukhelkhal, “Rhéologie caractéristique physico-mécanique et durabilité des bétons autaplaçants à base de la poudre de marbre, mémoire de magistère, Université Ammar Telidji Laghouat, Laghouat, (2012).
- [82] A.Ouai and A.R.Bedj, “L'effet synergique des ajouts cimentaires sur le Comportement rhéologique des mortiers fluide” mémoire de master, Université Ammar Telidji Laghouat, (2014).
- [83] A. S. E. Belaidi, “contribution a l'étude rhéologique et durabilité de béton autoplaçant apport des ajouts cimentaires ternaires et fillers locaux et industriels” thèse de doctorat, Saad Dahleb de blida, Blida, (2013).
- [84] OZAWA, K, MAEKAWA, K., OKAMURA, H. (1992, “Development of high performance concrete” Journal of the Faculty of Engineering, vol XLI, n°3, University of Tokyo.
- [85] J. Baron and J.P. Ollivier « Les bétons, Bases et données pour leur formulation. Eyrolles, 1996 ».
- [86] T. Sedran « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants », Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [87] T.T. Roshavelov « Concrete mixture proportioning with optimal dry packing ». In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.
- [88] GEORGE DREUX, JEANFESTA, nouveau guide du béton et de ses constituants, Eddition eyrolles 1998, pp, 8 :20.
- [89] PETER DOMONE, JOHN ILLSTON, Construction Materials/their nature and behaviour 4th edition, pp, 107.
- [90] UYSAL M, SUMER M, “Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures”, Construction and Building Materials2010, 25: 4112-20.
- [91] UYSAL M, YILMAZ K, “Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete”, Cement and Concrete Composites2011, 33: 771-6.
- [92] UYSAL M, YILMAZ K, IPEK M, “The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete”, Construction and Building Materials201, 27(1): 263-70.
- [93] PERA J, HUSSON S, GUILHOT B, “Influence of finely ground limestone on cement hydration”, Cement and Concrete Composites 1999, 21(2):99–105.

- [94] NFP 18-598, Octobre 1991: «Granulats - Détermination de la propriété des sables: Equivalant de sable». Indice de classement: P 18-597.
- [95] Lane, R.O., and Best, J.F, “Properties and use of fly ash in Portland cement concrete”, *Concrete International* 1982; 4(7): 81–92.
- [96] Yahia, A., Tanimura, M., and Shimoyama, Y, “Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ratio”, *Cement and Concrete Research* 2005; 35(3): 532–9.
- [97] Sonebi, M., and Bartos P.J.M, “ Hardened SCC and its bond with reinforcement ”, *Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7)*, Stockholm, Sweden, 13-15 September, 1999; 275-89
- [98] Topcu, I.B., Bilir, T., Uygunoglu, T, “ Effect of waste marble dust content as filler on properties of self compacting concrete ”, *Construction Building Materials* 2009; 23(5): 1947–53.
- [99] Sahmaran, M., Christianto, H.A., and Yaman, I.O, “ The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars ”, *Cement and Concrete Composites* 2006; 28(5): 432–40.
- [100] Whitehurst, E.A, “ Soniscope tests concrete structures ”, *Journal of the ACI* 1951; 47: 443–4.

Annexe

Tableau 1 Résultat d'essai d'analyse granulométrique.

Analyse granulométrique						
Classe granulaire	Masse (kg)	Ouvertures des tamis (mm)	Masse des refus (kg)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisât cumulés (%)	Module de finesse
(0/5)	2	5	0	0	100	2.02
		2.5	0.088	4.4	95.6	
		1.25	0.1048	9.64	90.36	
		0.63	0.2801	23.645	76.355	
		0.315	0.8845	67.87	32.13	
		0.16	0.5632	96.03	3.97	
		0.08	0.0515	98.605	1.395	
		Fond	0.0259	99.9	0.1	

Tableau 2 Résistance à la compression des mortiers binaires à base sur poudre de marbre

Résistance à la compression (MPa)				
Age (jour)	OPC	5PM	15PM	25PM
1	30.06	25.05	17.17	22.42
7	37.53	38.07	42.02	38.26
28	45.04	45.68	50.42	45.91
56	48.33	47.23	53.37	46.78

Tableau 3 Résistance à la compression des mortiers binaires à base sur déchet de brique

Résistance à la compression (MPa)				
Age (jour)	OPC	5DB	15DB	25DB
1	30.06	32.48	29.13	21.54
7	37.53	41.12	35.50	32.96
28	45.04	49.34	42.60	39.55
56	48.33	53.52	44.01	42.79

Tableau 4 Résistance à la compression des mortiers binaires à base sur le métakaolin

Résistance à la compression (MPa)				
Age (jour)	OPC	5MK	10MK	15MK
1	30.06	24.60	27.43	31.91
7	37.53	48.81	43.86	48.38
28	45.04	58.57	52.63	58.06
56	48.33	59.33	53.07	58.50

Tableau 5 Résistance à la compression des mortiers ternaires de poudre de marbre + déchet de brique

Résistance à la compression (MPa)			
Age (jour)	OPC	15PM15DB	15PM25DB
1	30.06	20.15	7.04
7	37.53	31.33	18.56
28	45.04	37.59	31.55
56	48.33	52.61	41.15

Tableau 6 Résistance à la compression des mortiers ternaires de poudre de marbre + métakaolin

Résistance à la compression (MPa)			
Age (jour)	OPC	15PM10MK	15PM15MK
1	30.06	20.40	20.26
7	37.53	34.90	28.42
28	45.04	41.88	34.10
56	48.33	50.03	40.75