

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AMMAR THELIDJI DE LAGHOAT



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
Option : Matériau de Construction (MDC)

Réalisé par :

RAMDANI FATIMA & SOULEM HADJER

Thème :

ETUDE REOLOGIQUE DE MORTIER
AUTOPLACANT DE HAUTE PERFORMANCE

Mémoire présenté devant le jury composé de:

Mr. BOUZIANI .T	Maître de conférences "A"	Président
M ^{me} .MERGHOUB.M	Maître assistant "A"	Examinatrice
Mr. BELAIDI A. S. E	Maître de conférences "A "	Encadreur

Promotion 2015- 2016

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier en premier lieu DIEU Miséricordieux qui nous à donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.

Nous tenons à remercier le président de jury et les examinateurs qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre mémoire.

Cette thèse est le fruit d'un long travail qui n'aurait pu arriver à terme sans l'aide de nombreuses personnes. Nous tenons à ce que chacune d'elles sache que je la remercie sincèrement.

Nous tenons à remercier en second lieu notre encadreur Monsieur Belaidi Akram Salah Eddine , 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.

Un spécial remerciement à tous les enseignants du département de Génie Civil qui ont contribué à notre formation.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail de tout mon cœur a ceux qui m'ont soutenu et encouragé de loin et de près à l'intérieur et l'extérieur.

Je l'offre avec tendresse et amour par ordre sentimental :

A ma raison de vivre ma mère, l'étoile qui m'a éclairé les moments les plus dures de ma vie, celle qui m'a redonné l'espoir et m'a encouragé. Je lui souhaite une longue vie pleine de bonheur.

A mon cher papa pour sa contribution depuis ma naissance jusqu'à mon objectif souhaité.

A mon frères Khaled, Nasereddine, Otmane, BakKar et Abdelatif que je lui souhaité un prospère avenir.

Ames sœurs : Yamina, Naima, Fatima qui ne me laisse jamais tomber

A tous mes femmes de mes frères et leurs enfants

A ma cher grande mère

A Finiche Mohammed, Zaanoune Omar et Ben koumar Mohammed

A mes adorables amis qui sont ma deuxième famille (Charifa sa mère et son père et ses frères et sœurs)

A mes tous les amis (es) (Hanane, Faïza, Fatima, Salim, Abedallah, Yaakoub, belkacem)

Un mot de remerciement à tous mes collègues qui a un moment ou un autre ont su être là par leur présence amicale ou par leur aide.

Hadjer

Dédicace

Je dédie ce travail

A ma famille en particulier

Mes parents et pour ma grand-mère

Mes frères, ma Sœurs

A tous les oncles et tantes Et surtout Ismail,

Ahmed et Kada et Belgassem, Mehizal, Mira , Sahaba et Adjila , ,

Belgassem et Ahmed Djilani, Taher .

A tous mes amis(es) en particulier Fatiha, Fatima, Zeinb,

khalldia, Houria, sara et bien sur Hadjer.

A tous les enseignants du département de génie civil

Au personnel du laboratoire de génie civil.

Fatima

Table des matières

الملخص	1
Résumé	2
Abstract1	3
Introduction	4
Chapitre 1. Etude bibliographique	6
1.1 Les bétons autoplaçants	6
1.1.1 Avantages techniques	6
1.1.2 Avantages socio-économiques	6
1.2 Principe de formulations des BAP	7
1.3 Cahier des charges minimum à l'état frais	8
1.4 Les bétons à hautes performances	10
1.5 Principe et formulations des BHP	11
1.6 Performances des BHP des propriétés exceptionnelles à l'état frais	11
1.7 Mortiers autoplaçants	12
1.7.1 Définition	12
1.7.2 Les composants du mortier autoplaçant	12
1.8 Propriétés essentielles d'un mortier autoplaçant	18
1.8.1 L'ouvrabilité et la fluidité	18
1.9 Mortier de réparation	21
1.10 Principe de réparation	21
1.10.1 Principe d'une réparation durable	22
Chapitre 2. Notions de base sur la rhéologie	24
2.1 Introduction	24
2.2 Importance de l'étude rhéologique	24
2.3 Définition des propriétés rhéologiques	25
2.3.1 Viscosité	25
2.3.2 Contrainte de cisaillement	26
2.3.3 Vitesse de cisaillement	26
2.3.4 Seuil de cisaillement	27
2.3.5 Thixotropie	28

2.4	Types de comportements rhéologiques	29
2.5	Courbes de comportement linéaires	29
2.6	Courbes de comportement non linéaires	29
2.7	Rhéologie des matériaux de Génie Civil	32
2.8	Etude rhéologique des mortiers autoplacants	32
2.9	Appareils de mesure rhéologique	33
2.9.1	Définition de rhéomètres	33
2.9.2	Mesures	34
2.9.3	Type du rhéomètre	34
2.10	Facteurs affectant la rhéologie des mortiers autoplacants.	35
2.10.1	Effet du rapport eau/ciment	35
2.10.2	Effet du type de ciment	36
2.10.3	Effet des adjuvants	36
2.10.4	Effet des additions minérales	37
2.10.5	Effet des fibres	39
2.11	Conclusion	40
Chapitre 3. Caractérisation des matériaux ; formulations et expérimentations		41
3.1	Introduction	41
3.2	Caractérisation des matériaux	41
3.2.1	Sable	41
3.2.2	Ciment	45
3.2.3	Additions	47
3.2.4	Superplastifiant	48
3.2.5	Les fibres de polypropylènes	49
3.2.6	Eau de gâchage	49
3.3	Formulation du mortier autoplacant	50
3.3.1	Rapport Eau/Liant (E/L)	51
3.3.2	Rapport Sable/Mortier (S/M)	51
3.3.3	Variation du rapport Superplastifiant /Liant (Sp/L)	51
3.3.4	Remplacement du ciment par les additions (Fumée de silice +Poudre de Marbre)	52
3.4	Matériels utilisés	53
3.4.1	Malaxeur	53
3.4.2	Mini Cône	53
3.4.3	Rhéomètre à mortier.	54
3.4.4	Autres accessoires	55

3.5	Préparation des mortiers	55
3.6	Essais expérimental	56
3.6.1	Essai d'étalement de MAP	56
3.6.2	Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel)	56
3.6.3	Essai au rhéomètre de MAP	57
3.7	Conclusion	63
Chapitre 4. Analyses des résultats et interprétations		64
4.1	Introduction	64
4.2	Etude rhéologique de mortier autoplaçant de référence	64
4.3	Étude rhéologique de mortier autoplaçant à base des ciments binaires	65
4.3.1	Mortier à base des ciments binaire de la poudre de marbre	65
4.3.2	Mortier à base des ciments binaire de la fumée de silice	69
4.3.3	Effet de superplastifiant sur les paramètres rhéologiques	74
4.4	Étude rhéologique de mortier autoplaçant à base des ciments ternaires	77
4.4.1	Effet du couple 5% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre	78
4.4.2	Effet du couple 10% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre	82
4.4.3	Effet de l'ajustement de superplastifiant	86
4.4.4	Effet du couple 15% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre	90
4.4.5	Effet de l'ajustement de superplastifiant	94
4.4.6	Effet des fibres sur les propriétés rhéologiques	98
4.5	Etude des propriétés mécanique des mortiers autoplaçant	100
4.5.1	La résistance à la compression	101
4.5.2	Retrait	105
4.5.3	Absorption d'eau par capillarité	111
Conclusion générale		112
Recommandations		115
Références bibliographiques		116

Liste des figures

Figure 1.1. Phénomène de blocage des granulats droits d'un obstacle	8
Figure 1.2 . Le mécanisme d'action du superplastifiant à base de polycarboxilate (ACI)	17
Figure 1.3. Essai d'Étalement pour Mortier	19
Figure 1.4 .Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier	19
Figure 2.1. Schéma glissement des couches.....	25
Figure 2.2. Schéma de vitesse de cisaillement.	27
Figure 2.3. Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton	28
Figure 2.4. Phénomènes thixotrope et anti thixotrope	28
Figure 2.5. Différents comportements rhéologiques	30
Figure 2.6. Différents modèles rhéologique	32
Figure 2.7. Rhéomètres à bétons existants : BML (a) ; BT Rhéom (b) ; Cemagref (c) ; IBB (d) ; ICAR ; Two point test (f)	35
Figure 2.8. Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons	36
Figure 2.9. Effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques	37
Figure 2.10. Effet de la distribution granulaire de la fumée de silice sur la variation de la viscosité	39
Figure 3.1. Tamiseuse électrique.....	41
Figure 3.2. Courbe granulométrique du sable alluvionnaire de Laghouat	42
Figure 3.3. Equivalent de sable à vue et au piston	44
Figure 3.4. Essai de l'équivalent de sable.	44
Figure 3.5. Teste de pré-séchage avec le cône et le piston.....	45
Figure 3.6. Ciments utilisés dans la confection des mortiers autoplaçants.	46
Figure 3.7. Essai de la volumique absolue du ciment	46
Figure 3.8. Fumée de silice.	47
Figure 3.9. La poudre de marbre.....	48
Figure 3.10. Superplastifiant haut réduction d'eau.	49
Figure. 3.11 Fibres de polypropylènes	49
Figure 3.12. Composition de mortier autoplaçant.	51
Figure 3.13. Malaxeur.....	53
Figure 3.14. Mini cône.....	53
Figure 3.15. Dispositif du rhéomètre utilisé.....	54
Figure 3.16. Balance	55
Figure 3.17. Exécution et mesure d'étalement en mini-cône	56
Figure 3.18. Exécution et mesure d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel)	57
Figure 3.19. Profil de vitesse	58
Figure 3.20. Positionnement de la pale de rhéomètre	59
Figure3.21. Moules pour moulage des éprouvettes de mortier	60
Figure 3.22. Conservations d'éprouvettes	60
Figure 3.23. Dispositif pour l'essai de résistance à la compression.	61
Figure 3.24. Dispositif pour l'essai de retrait.....	62
Figure 3.25. Essai d'absorption d'eau par capillarité	63
Figure 4.1. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier auto plaçant binaire (ciment + poudre de marbre).....	66
Figure 4.2. Influence de la poudre de marbre sur la viscosité des mortiers autoplaçant.	66
Figure 4.3. Effet taux de substitution par la poudre de marbre sur le seuil de cisaillement.	67

Figure 4.4. Effet de dosage de poudre de marbre sur l'étalement.	68
Figure 4.5. Effet de dosage de poudre de marbre sur le temps d'écoulement.	69
Figure 4.6. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier auto plaçant binaire (ciment + fumée de silice).	70
Figure 4.7. Influence de la fumée de silice sur la viscosité des mortiers autoplaçant.	71
Figure 4.8. Effet taux de substitution par la fumée de silice sur le seuil de cisaillement.	72
Figure 4.9. Effet de fumée de silice sur l'étalement des mortiers autoplaçant.	73
Figure 4.10. Variation de temps d'écoulement en fonction de la teneur en fumée de silice	73
Figure 4.11. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier auto plaçant binaire (ciment + fumée de silice) avec SP variable.	75
Figure 4.12. Effet d'ajustement du dosage en SP sur la viscosité μ	75
Figure 4.13. Effet d'ajustement du dosage en SP sur le seuil de cisaillement μ	76
Figure 4.14. Effet de la correction du dosage en supréplastifiant sur l'étalement.	76
Figure 4.15. Effet de la correction du dosage en supréplastifiant sur le temps d'écoulement des mortiers.	77
Figure 4.16. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier auto plaçant ternaire de 5% de la fumée de silice et de la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) constant.	79
Figure 4.17. Évolution de la viscosité des mortiers ternaires base à 5% de la fumée de silice et de la poudre de marbre.	79
Figure 4.18. Evolution de seuil de cisaillement mortiers ternaires base à 5% de la fumée de silice et de la poudre de marbre.	80
Figure 4.19. Effet de la combinaison de la fumée de silice et poudre de marbre sur l'étalement.	81
Figure 4.20. Effet de la combinaison de la fumée de silice et poudre de marbre sur temps d'écoulement.	82
Figure 4.21. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier auto plaçant ternaire de 10% de la fumée de silice et de la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) constant.	83
Figure 4.22. Variation de la viscosité du mortier ternaire avec 10% fumée de silice et X% poudre de marbre ...	84
Figure 4.23. Variation de seuil de cisaillement du mortier ternaire avec 10% fumée de silice et X% poudre de marbre.	84
Figure 4.24. Effet de la fumée de silice sur les mortiers ternaire (Ciment +10% fumée de silice +X% poudre de marbre) sur l'étalement des mortiers.	85
Figure 4.25. Effet de la fumée de silice sur les mortiers ternaire (Ciment +10% fumée de silice +X% poudre de marbre) sur l'étalement des mortiers.	86
Figure 4.26. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de fumée de silice et poudre de marbre avec SP variable.	87
Figure 4.27. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de fumée de silice et poudre de marbre.	88
Figure 4.28. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de fumée de silice et poudre de marbre.	88
Figure 4.29. Influence de la correction du dosage en supréplastifiant sur l'étalement.	89
Figure 4.30. Influence de la correction du dosage en supréplastifiant sur temps de d'écoulement.	90
Figure 4.31. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de 15% de fumée de silice et poudre de avec SP constant.	91
Figure 4.32. Variation de viscosité des mélanges ternaires avec 15% FS.	92
Figure 4.33. Variation de seuil de cisaillement des mélanges ternaires avec 15% FS.	92
Figure 4.34. Effet du couple 15% de fumée de silice et poudre de marbre sur l'étalement	93
Figure 4.35. Effet du couple fumée de silice et poudre de marbre sur temps d'écoulement	94
Figure 4.36. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de 15% de fumée de silice et poudre de avec SP variable.	95
Figure 4.37. Variation de viscosité du mortier ternaire (15% FS+X% PM) avec SP variable.	96
Figure 4.38. Variation de seuil de cisaillement du mortier ternaire (15% FS+X% PM) avec SP variable.	96
Figure 4.39. Effet d'ajustement du dosage en SP sur l'étalement.	97
Figure 4.40. Effet d'ajustement du dosage en SP sur le temps d'écoulement.	97
Figure 4.41. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de fumée de silice et 0.25% des fibres avec SP variable.	99

Figure 4.42. Variation de viscosité du mortier autoplaçant renforcé par des fibres.	99
Figure 4.43. Variation de seuil de cisaillement du mortier autoplaçant renforcé par des fibres.....	100
Figure 4.44. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant de la fumée de silice	101
Figure 4.45. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant de la poudre de marbre	102
Figure 4.46. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre	104
Figure 4.47. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre.	104
Figure 4.48. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre.	105
Figure 4.49. montre la variation du retrait des mortiers binaire base à la fumée de silice en fonction de l'âge. ...	106
La figure 4.50. illustre les variations de retrait de mortier binaire base à la poudre de marbre en fonction de l'âge.	107
Figure 4.51. Variation du retrait des mortiers ternaire base de 5% FS + X% PM.	108
Figure 4.52. Variation du retrait des mortiers ternaire base de 10% FS + X% PM.	108
Figure 4.53. Variation du retrait des mortiers ternaire base de 15% FS + X% PM.	109
Figure 4.54. montre la variation du retrait des mortiers binaire base à la fumée de silice avec fibre en fonction de l'âge.	110

Liste des tableaux

Tableau 2-1. Définitions des viscosités	26
Tableau 3-1. L'essai de l'analyse granulométrique	42
Tableau 3-2. Caractéristique physique du sable.	45
Tableau 3-3. L'analyse chimique du ciment utilisé.	47
Tableau 3-4. L'analyse chimique de la fumée de silice utilisée	47
Tableau 3-5. Propriétés physico-chimiques de la poudre de marbre.....	48
Tableau 3-6. Différentes Combinaison des MAP binaire, ternaire.	52
Tableau 3-7. Procédure de malaxage et mode d'introduction de l'adjuvant.	56
Tableau 4-1. Tableau récapitulatif des résultats de mortier autoplaçant.	65
Tableau 4-2. Composition et résultats des essais sur les mortiers autoplaçants binaires (poudre de marbre).....	65
Tableau 4-3. Composition et résultats des essais des mortiers autoplaçant binaire (fumée de silice).	70
Tableau 4-4. Composition et résultats des essais d'ouvrabilité de mortier autoplaçant binaire fumé de silice avec dosage de super plastifiant variable	74
Tableau 4-5. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants ternaires avec 5% fumé de silice avec dosage de super plastifiant constant.....	78
Tableau 4-6. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants ternaires avec 10% fumé de silice avec dosage de super plastifiant constant.....	83
Tableau 4-7. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants ternaires avec 10% fumé de silice avec dosage de superplastifiant variable	87
Tableau 4-8. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants ternaires avec 15% fumé de silice avec dosage de super plastifiant constant.....	91
Tableau 4-9. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants ternaires avec 15% fumé de silice avec dosage de super plastifiant variable	95
Tableau 4-10. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants binaire à base du fumé de silice avec dosage de superplastifiant variable.	98
Tableau 4-11. Résistance à la compression des mortiers binaires à base sur fumée de silice	101
Tableau 4-12. Résistance à la compression des mortiers binaires à base sur la poudre de marbre	102
Tableau 4-13. Résistances à la compression des mortiers ternaires	103
Tableau 4-14. Les valeurs des coefficients d'absorption pour les mortiers binaires et ternaires.	111

الملخص

ان الهدف من هذه الدراسة هو دراسة تأثير مسحوق الرخام والغبار السيليس على الخواص الريولوجية والميكانيكية لمونة ذاتية التسوية المخصصة للترميم. في هذا العمل، تم اعداد خمسة عشر تركيبة أعدت بنسبة $W/P = 0.4$ ونسبة من الملدن 0.8%. تحتوي تركيبة المرجعية فقط على الاسمنت بورتلاند الاصطناعي كرابط هيدروليكي، في حين المونة ثنائية الرابط المكونة إما من الغبار السيليس (5%، 10% و 15%) أو مسحوق الرخام بنسب مختلفة (10%، 20% و 30%).

أما بالنسبة للمونة ثلاثية الروابط متكونة حسب ثلاث نظم من $(5\%FS + X \%PM)$ ، $(10\%FS + X \%PM)$ و $(15\%FS + X \%PM)$. 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)، والانكماش وامتصاص المياه شعري.

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

كلمات البحث: مونة ذاتية التسوية، مسحوق الرخام، غبار السيليس، الألياف، مونة الترميم، الريولوجيا، اجهاد

الضغط، انكماش.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la poudre de marbre (PM) et fumée de silice (FS) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers autoplaçants destinés à la réparation (MAP). Pour ce travail, quinze compositions ont été préparées avec un rapport E/P=0,4, et un dosage en superplastifiant de 0,8%. La composition de référence contient uniquement le ciment Portland artificiel comme liant, alors que pour les mortiers binaires leurs compositions comportent de la fumée de silice (5%,10% et 15%) ou de la poudre de marbre à différents pourcentages (10%, 20% et 30%) et pour les mortiers ternaires la substitution ce fait selon trois systèmes (5% FS + X% PM), (10% FS + X% PM) et (15% FS + X% 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 durcis les propriétés mécaniques telles que les résistances mécaniques (résistance à la compression), le retrait et l'absorption d'eau capillaire sont aussi testés.

D'après les résultats, on remarque que pour les mortiers autoplaçants à base des ciments binaires composé de la poudre de marbre influe positivement sur les propriétés rhéologiques. Par contre la fumée de silice affecte négativement les mortiers à base des ciments binaire.

Pour les mortiers à base des ciments ternaires à la combinaison de 15% FS +X % PM, présente les meilleurs comportements rhéologiques et mécanique.

A l'état durci, l'incorporation de la fumée de silice dans les mortiers autoplaçants conduit à une augmentation des résistances mécaniques.

Mots clés : *mortier autoplaçant, poudre de marbre, fumée de silice, mortier de réparation, fibres, rhéologie, résistances à la compression, retrait.*

Abstract1

The objective of this study was to investigate the influence of marble powder (MP) and silica fume (FS) on the rheological and mechanical properties of self-compacting mortar repair (SCM). For this work, fifteen compositions were prepared with W/P=0.4 ratio and a dosage of superplasticizer 0.8%. The reference composition contains only the artificial Portland cement as a binder, while for binary mortars their compositions contained the silica fume (5%, 10% and 15%) or the marble powder in different percentages (10%, 20% and 30%) and for ternary mortars substitution thus in three systems (5% FS + X% MP), (10% FS + X% MP) and (15% FS + X% 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 shrinkage and the capillary water absorption were also tested.

From the results, we note that for self-compacting mortars based binary cements composed of marble dust positively influences the rheological properties. Against by fumed silica affects negatively mortars based binary cements.

In the hardened state, the incorporation of silica fume in the self-compacting mortar leads to increased strength.

Keywords: *self-compacting mortar, marble powder, silica fume, repair mortar, fibre, rheology, compressive strength, shrinkage.*

Introduction

Le béton est un matériau utilisé depuis des millénaires à cause de la facilité de sa fabrication, de sa simple mise en place à l'état frais, de ses propriétés mécaniques et de durabilité à l'état durci. On estime actuellement que la production mondiale atteint une moyenne annuelle d'une tonne de béton par habitant. Parmi les différentes familles de béton se situent le béton autoplaçant (BAP), ce type de béton est encore en cours d'émergence dans le domaine de la construction civile, bâtiment et travaux publics.

Les BAP ont certes la particularité de présenter une grande fluidité, mais celle-ci peut être limitée par une sensibilité à la ségrégation des plus gros granulats, liée surtout à la forte adjuvantation de superplastifiant. Le sujet pose une problématique orientée surtout vers des exigences d'amélioration de la rhéologie du béton. Pour acquérir une véritable rhéologie de BAP, il semble que le volume des fines ait un rôle non négligeable à jouer. Notre travail a donc consisté, en premier lieu, à mettre en évidence, à partir d'essais expérimentaux, l'influence de différents paramètres de formulation sur les paramètres rhéologiques tels que la viscosité et le seuil de cisaillement et l'ouvrabilité du béton. Ensuite, il fallait vérifier l'incidence de ces variations de formulation sur les propriétés mécaniques et les déformations différées qu'elles induisent les variations ont porté sur les particules de la taille du ciment.

Les Bétons à hautes performances (BHP) sont des bétons fluides qui développent des résistances mécaniques très élevées (60 à 80 MPa), du fait de la diminution de la porosité par les superplastifiants, qui, réducteurs d'eau, assurent aussi une maniabilité suffisante. De plus, le spectre du mélange granulaire est élargi par l'ajout d'éléments ultrafins qui confèrent à l'ensemble une forte compacité et une haute durabilité vis-à-vis des agents agressifs chimiques extérieurs. Cependant, la plupart des ouvrages d'art dans lesquels sont utilisés des BHP, présentent des ferraillements très denses (supérieurs à 200 kg/m³), associés à la présence de gaines de précontrainte. L'ensemble constitue un réseau d'obstacles à la mise en œuvre de ces BHP, de consistance normale, et nécessite une vibration souvent difficile dans des coffrages densément ferrillés.

L'objectif de la thèse est alors de mettre en évidence les différents paramètres de formulation qui tendent à améliorer les propriétés liées à l'écoulement des mortiers autoplaçants à hautes performances.

Les propriétés des BAP sont généralement liées aux celles de leurs mortiers autoplacants (MAP) qui ont été abordés ici du point de vue rhéologique, c'est-à-dire de leurs capacités à s'écouler. Pour cela, la notion d'ouvrabilité et les besoins de la caractérisation rhéologique des matériaux cimentaires sont expliqués. La confection de mortier autoplacants (MAP) nécessite un grand volume d'addition minérale de manière à augmenter le volume de pâte permettant ainsi d'atteindre la fluidité qui fait le caractère autoplacant. Les effets des additions minérales sur le comportement à l'état frais et à l'état durci des MAP sont de grande importance pour un plus large usage de ces matériaux.

L'étude entreprise dans cette mémoire vise à atteindre un objectif principal suivant :

- Concilier les propriétés d'un mortier de haute performance (MHP) avec les propriétés rhéologiques d'un mortier autoplacant (MAP); c'est-à-dire arriver à formuler un mortier autoplacant à haute performances MAP-HP et étude des effets de l'incorporation des ajouts minéraux (actifs et inertes) fumée de silice et la poudre de marbre sur les propriétés rhéologique mécanique des mortiers confectionnés à base de ciment binaire et ternaire .
- Faire une étude de la rhéologie de mortier autoplacant distingué à la réparation .

En plus de l'introduction générale ce mémoire est composé de quatre chapitres présentés comme suit :

- **Le 1^{er} chapitre** : présente une synthèse bibliographique sur béton autoplacant et béton à haute performances et les mortiers autoplacants.
- **Le 2^{ème} chapitre** : présente des notions de base sur la rhéologie des bétons fluides leurs propriétés rhéologiques, les dispositifs de mesure, rhéomètres et les paramètres d'influence sur la rhéologie.
- **Le 3^{ème} chapitre** : Résume les différents essais de caractérisation des matériaux utilisés et la méthode de formulation de mortier autoplacant, qui ont été réalisés dans le cadre de ce travail, caractérisant l'ouvrabilité et la rhéologie mortier autoplacant à l'état frais, et les propriétés mécaniques des mortiers autoplacant à l'état durci.
- **Le 4^{ème} chapitre** : Analyse et discussions des résultats des différents essais réalisés.

En fin une **conclusion générale** qui regroupe les principaux résultats obtenus.

Chapitre 1. Etude bibliographique

1.1 Les bétons autoplaçants

Les bétons autoplaçants (B.A.P) sont des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en œuvre sans vibration. D'autres expressions sont aussi utilisées : béton auto-compactable, béton très fluide ou des expressions anglo-saxonnes : self compacting concrete, self levelling concrete, high fluidity concrete. Son développement a commencé au Japon à la fin des années 1980 pour des raisons économiques (réduction de la main d'œuvre, rapidité de mise en place) et s'est progressivement répandu dans le reste du monde. En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire :

1.1.1 Avantages techniques

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé).
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.
- Réalisation d'éléments de forme plus complexe.

1.1.2 Avantages socio-économiques

- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.
- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage.
- Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton autoplaçant :
- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales.
- Compatibilité des matériaux.
- Etanchéité des coffrages.

Certains font les distinctions entre le béton autoplaçant qui est employé pour un coulage vertical et le béton auto-nivelant qui correspond à une mise en œuvre horizontale. Le béton est constitué de composants de caractéristiques morphologiques, mécaniques et physico-chimiques très différentes : ciment, granulats, eau, air, et éventuellement adjuvants ou ajouts. Chacun de ces éléments joue un rôle différent dans le comportement du béton frais, pendant la prise et le durcissement ; même à l'état frais, les interactions des différentes phases sont nombreuses et l'étude du comportement rhéologique de l'ensemble devient particulièrement difficile si on désire la conduire en analysant l'influence de tous les éléments. Une première simplification consiste à considérer le béton frais comme un matériau à deux phases : une phase visqueuse constituée par la pâte de ciment et une phase granulaire composée par l'ensemble des granulats. Des travaux ont déjà été faits dans ce domaine, qui montre que cette schématisation peut constituer une approche intéressante de la réalité dans la mesure où la teneur en eau de la pâte est calculée en tenant compte de l'eau gâchée retenue par les granulats. A travers ces études, il apparaît que la pâte joue un rôle fondamental et qu'il serait vain de vouloir comprendre le comportement rhéologique du béton frais sans connaître celui de la pâte qui le compose. C'est grâce à cette connaissance que pourront s'expliquer les aptitudes du béton frais au malaxage, au transport sans ségrégation, à la mise en place, au serrage, etc.

1.2 Principe de formulations des BAP

Ces bétons présentent plusieurs propriétés qui justifient l'intérêt nouveau que leur portent les industriels [1] :

- absence de vibration qui réduit les nuisances sonores,
- bétonnage de zones fortement ferrillées et à géométrie complexe,
- pénibilité du travail moindre,
- réduction du coût de la main d'œuvre, durée de construction plus courte.
- augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants)

Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients :

- modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- la première concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la

déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.

- une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

1.3 Cahier des charges minimum à l'état frais

Plusieurs spécificités de composition des BAP découlent de ces diverses approches.

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants.
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement (figure 1.1). Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée.

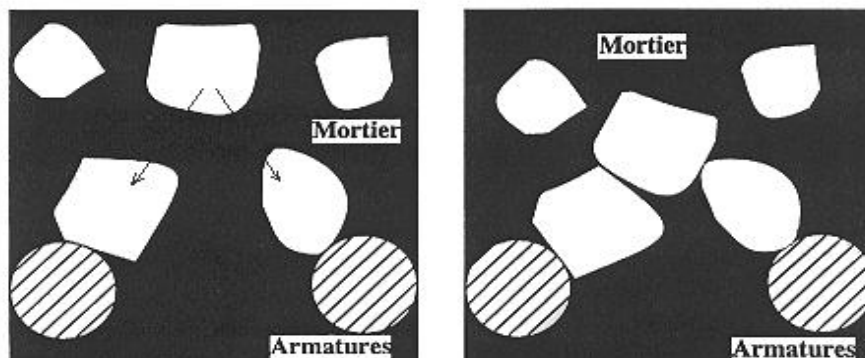


Figure 1.1. Phénomène de blocage des granulats droits d'un obstacle [2]

- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.
- De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées

En zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures. En résumé, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton.

1.4 Les bétons à hautes performances

Les bétons à hautes performances (BHP) sont des bétons qui développent des résistances mécaniques élevées (plus de 60 MPa) du fait de la diminution de la porosité rendue possible grâce à l'ajout de super plastifiants qui diminuent la teneur en eau nécessaire à l'obtention d'une maniabilité suffisante. De plus, le spectre du mélange granulaire utilisé est élargi par l'ajout d'éléments ultrafins qui confèrent à l'ensemble une haute compacité [3]. De ce fait, ces bétons présentent une durabilité accrue [4] grâce à une perméabilité réduite.

Le BHP est à l'origine une appellation française qui s'est aujourd'hui généralisée dans le monde. Il s'agit de bétons créés au milieu des années 70 pour la construction de bâtiments de grande hauteur aux Etats-Unis ou au Canada et en Europe du Nord, notamment en Norvège, Les avancées technologiques seront dans les bétons autoplaçants et les Bétons Fibrés à ultra Hautes Performances (BFUHP). Pour les premiers, il ne s'agit plus de travailler la résistance ou la durabilité mais d'améliorer la mise en œuvre. Quant aux BFUHP, ils constituent un matériau qui permet de s'affranchir de tout ferrailage passif et d'obtenir des résistances de 150 à 200 MPa grâce à une granulométrie très fine. Concernant les BHP, il reste à travailler sur leur résistance au feu. La question du BHP est très vaste ; elle recouvre tous les aspects le différenciant du béton traditionnel, c.-à-d. des changements relatifs tant aux composants, à la composition, à la mise en œuvre qu'aux propriétés. Des années durant, la fabrication du béton n'a nécessité que des granulats, du ciment et de l'eau. Ce dernier composant remplit un double rôle : il permet l'hydratation du ciment et confère au béton frais sa nécessaire ouvrabilité. Cette ouvrabilité nécessite cependant une quantité d'eau supérieure à ce qui est strictement nécessaire pour l'hydratation. Une partie de cette eau pour un rapport eau-ciment de 0,5, elle équivaut à environ la moitié de l'eau de gâchage et reste dans le béton au terme du processus de prise et de durcissement. Elle se répand dans tout le béton et cause l'apparition d'un réseau de pores et de vides. L'augmentation de l'excédent en eau est proportionnelle au diamètre moyen des pores ainsi que de leur volume. Un nombre accru de pores de plus grandes dimensions affaiblit la structure du matériau et réduit dès lors la résistance du béton. Il y donc un lien direct entre la résistance à la compression et l'eau de gâchage ajoutée au béton ou – formulé de manière plus scientifique – entre la résistance à la compression et le rapport entre la quantité d'eau et de ciment, que l'on appelle le rapport eau-ciment, E/C. En fonction de l'augmentation ou de la diminution de ce rapport, la résistance du béton diminuera ou augmentera. La durabilité du béton augmente donc avec la réduction du volume

des pores (porosité réduite, compacité accrue) et du rétrécissement des pores (réduction de la perméabilité). Il s'ensuit que le rapport eau-ciment doit être le plus faible possible.

1.5 Principe et formulations des BHP

Le BHP est un matériau présentant de nombreux avantages pour son utilisation dans les structures de Génie Civil. Ses résistances mécaniques en compression et en traction sont très élevées (au-delà de 60 MPa en compression à 28 jours). Cette très grande résistance est obtenue en particulier en limitant la porosité ce qui lui confère de plus une très bonne résistance aux agressions chimiques. La faible perméabilité du BHP limite les transferts à travers le matériau et donc les effets des agressions. La formulation des BHP est une opération plus complexe que celle des bétons classiques. Le point critique consiste souvent à « marier » un ciment et un adjuvant superplastifiant, de façon à ce qu'ils conduisent à un mélange fluide (bien que de teneur en eau faible). Ainsi il sera nécessaire de connaître pour chaque adjuvant la dose de saturation, au-delà de laquelle le produit n'a plus d'effet fluidifiant supplémentaire. La résistance du béton est liée à sa porosité et à la distribution des pores capillaires. La recherche des hautes performances passe donc par la réduction de la porosité du béton.

1.6 Performances des BHP des propriétés exceptionnelles à l'état frais

Les BHP présentent une fluidité, une ouvrabilité, une aptitude au pompage et un maintien de la plasticité dans le temps à l'état frais qui apportent de nombreux avantages lors de la mise en œuvre :

- Un bon remplissage des moules et des coffrages et de l'enrobage parfait des armatures
- L'amélioration de l'écoulement du béton, en particulier dans les zones très ferraiées
- La réduction du délai d'exécution de l'ouvrage et gain de productivité
- L'exécution de bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles

Le BHP présente aussi :

- Une bonne stabilité à l'état frais, ce qui garantit l'absence de ségrégation
- Une faible viscosité qui autorise le pompage sur de longues distances.

Obtenue avec pourtant un moindre dosage en eau, c'est la conséquence de la défloculation des grains de ciment et, lorsqu'on y a recours, de la présence d'ultrafines jouant aussi un rôle de lubrifiant entre éléments de plus grande taille [5].

1.7 Mortiers autoplaçants

1.7.1 Définition

Le mortier autoplaçant correspond à l'ensemble ciment, additions, eau efficace, air, adjuvants. Chacun de ces éléments joue un rôle différent dans le comportement du mortier frais et durci, l'étude du comportement rhéologique et mécanique de l'ensemble devient particulièrement difficile si on désire la conduire en analysant l'influence de tous les éléments.

1.7.2 Les composants du mortier autoplaçant

1.7.2.1 Ciment

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 C°, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et durcir en présence d'eau, et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium [6]

1.7.2.2 Les ajouts minéraux

1.7.2.2.1 *Les ajouts inertes*

❖ *Fillers calcaires*

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (Calcaires, basalte, bentonite, etc.). Présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75%. Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micron.

Les fillers se différencient les uns des autres par :

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine [7].

❖ **La poudre de marbre**

Le marbre est une roche métamorphique résultant de la transformation d'un calcaire pur. Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect : il est blanc si la roche dont il provient était principalement composée de calcite (100 % CaCO_3). Mis en œuvre dans la construction et la décoration. Une grande quantité de poudre est générée lors de la découpe. Son utilisation en remplacement du calcaire, dans la production de ciment, dans la mesure où elle n'altère pas trop les caractéristiques du béton, permettra de réduire l'impact de sa mise en décharge [8].

1.7.2.2.2 **Les ajouts actifs**

❖ **La pouzzolane**

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, Stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [9]. Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

• *Pouzzolane naturelle*

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et D'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique .Elle peut être d'origine volcanique : verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire : terre à diatomées, diatomites.

• *Pouzzolane artificielle*

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Les roches traitées thermiquement : argiles, schistes, latérite, bauxite.

❖ **Laitier de haut fourneau**

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux L'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [9].

❖ Fumée de silice

L'idée de l'utilisation des fumées de silice dans le béton est née dans le but de minimiser la pollution de l'environnement. Afin de limiter les déchets polluants de l'industrie du silicium et de ses alliages, les pays scandinaves ont utilisé les fumées de silice comme un ajout dans le béton. Cependant, le développement de la technologie des adjuvants et surtout les superplastifiants haut réducteurs d'eau a facilité l'incorporation des fumées de silice, et à contribuer dans l'amélioration des caractéristiques du béton que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium métallique ou des différents ferro-alliages contenant du silicium comme le (FeSi, CaSi). Les fumées de silice proviennent de la condensation de vapeurs de SiO qui sont produites dans un four à arc électrique à une température de 2000°C où le quartz est réduit à l'état de silicium. Dès que ces vapeurs de SiO entrent en contact avec l'air dans les parties les plus froides du four, elles s'oxydent et se condensent sous forme de microsphères de silice.

• *Propriétés physico-chimiques des fumées de silice*

Les fumées de silice ont une structure vitreuse, ayant un diamètre moyen de l'ordre de 0.1 µm, elles sont donc 100 fois plus fines que les grains de ciment et contiennent en général plus de 90% de silice.

• *Mécanisme d'action de la fumée de silice dans le béton*

Grâce à ses caractéristiques physico-chimiques, telles que la très grande finesse et la teneur en silice (plus de 92%) ainsi que sa structure vitreuse, les fumées de silice peuvent agir selon trois mécanismes d'action :

✓ Effet pouzzolanique

Grâce à leur finesse, les fumées de silice réagissent très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former du C-S-H, et on peut observer des gains de résistance en compression à jeune âge (7 jours) contrairement à la pouzzolane naturelle ou artificielle où il faut attendre plus de 28 jours pour observer des gains de résistance en compression.

✓ Effet physico-chimique

L'utilisation de la fumée de silice a pour effet de rendre le béton plus compacte et Imperméable. Grâce à sa réaction pouzzolanique avec la chaux dégagée par le clinker lors de l'hydratation du ciment, on observe après 7 jours que les pores ayant un diamètre de

0.1 μm commencent à se boucher en parallèle avec la diminution du diamètre des pores les plus fins, ce phénomène se poursuit au fur et à mesure que le béton vieillit.

✓ Effet physique

Les particules de fumée de silice étant vitreuse et fines, elles permettent de remplir les pores les plus fins de l'empilement des grains de ciment. D'après P-C.AITCIN, la fumée de silice peut plastifier les bétons à faible rapport E/L, en chassant l'eau qui se trouve entre les particules de ciment [10]

L'utilisation de la fumée de silice exige inévitablement l'introduction d'un superplastifiant lors du malaxage du béton pour défloculer les grains de ciment et les particules de fumée de silice d'une part, et garder la même maniabilité que les bétons ordinaires d'autre part, car l'utilisation de la fumée de silice a pour effet d'augmenter la demande en eau, à cause de l'ancrage de ses particules entre elles.

• *Influence des fumées de silice sur les propriétés des bétons*

Par leurs caractéristiques morphologiques et minéralogiques, les fumées de silice peuvent influencer sur les propriétés des bétons à l'état frais ou à l'état durci :

✓ À l'état frais

L'utilisation des fumées de silice, permet :

- ❖ D'augmenter le volume des particules fines dans le béton, ce qui permet de réduire les risques de ségrégation et d'éliminer pratiquement le ressuage, dans le cas des bétons autoplaçants ;
- ❖ De faciliter les conditions de transport et de mise en place du béton par pompage.

✓ À l'état durci

- ❖ Augmenter considérablement la résistance en compression et l'imperméabilité du béton (Les bétons contenant 10% de fumée de silice deviennent pratiquement Imperméables) ;
- ❖ Remplacer une certaine quantité de ciment et obtenir la même résistance compression à 28 jours (d'après P.C.AITCIN, avec un dosage de 7 à 12% de la masse de ciment, 1 kg de fumée de silice peut remplacer de 3 à 4 kg de ciment) ; [10]
- ❖ Réduire considérablement la quantité de chaleur qui se développe dans un béton, grâce à la réduction du dosage en ciment.

1.7.2.3 Le sable

C'est un matériau naturel ou artificiel dont au moins 50% des diamètres de grains sont supérieurs à $80\ \mu\text{m}$ et dont la taille n'excède pas 5mm [11,12]. La classification du sable est fondée sur trois paramètres essentiels :

- La provenance des grains (calcaire, silice) ;
- La granularité ;
- La propreté.

En effet, plusieurs types de sables sont à distinguer, parmi lesquels on trouve :

- **Les sables naturels** : Ils sont utilisés en construction des différents projets de construction et prélevés soit dans les alluvions des rivières ou des fleuves (sable, roulé), soit sur les plages ou les dunes naturelles.
- **Les sables artificiels** : Sont soit du sable de concassage ou du sable roulés provenant de la production des matériaux concassés.

1.7.2.4 Superplastifiants

Les superplastifiants sont apparus à la fin des années 1970 au Japon et en Allemagne. Ce sont généralement des sels sulfoniques de formaldéhydes, naphthalènes ou mélamines, qui ont la propriété de pouvoir améliorer notablement la fluidité d'une gâchée, et donc de diminuer la quantité d'eau nécessaire à sa mise en œuvre. Leur arrivée sur le marché a permis le développement des bétons à "hautes performances".

Ces superplastifiants assurent une défloculation de la suspension de ciment en solution aqueuse, ce qui améliore caractéristiques rhéologiques du mélange [13]. Les mécanismes responsables de cet effet sont encore discutés. Il semble certain, que ces molécules organiques se fixent à la surface du grain de ciment. La défloculation serait obtenue par répulsion électrostatique des nuages de molécules ainsi formés en périphérie des grains et/ou par l'encombrement stérique de ces molécules qui empêcherait les contacts entre les particules de ciment. En définitive, ces produits auraient un rôle de dispersant et lubrifiant. Enfin, l'abaissement de la tension de surface de l'eau améliorerait également la fluidité du système.

Le niveau élevé de la cohérence requis par les BAP tout en maintenant la stabilité du mélange a mené à l'utilisation d'un certain nombre d'adjuvants dans le béton. La demande élevée en eau pour réaliser une fluidité requise par le BAP, était tout impraticable compte tenu du dosage très élevé de ciment qui était souvent requis pour permettre aux conditions de résistance à la compression d'être rencontrées. L'arrivée des superplastifiants et la technologie de développements de ces adjuvants, ont joué un rôle essentiel dans le développement des

BAP. Les superplastifiants modernes (basés sur les éthers polycarboxyliques) favorisent la conservation de la fluidité souhaitée tout en maintenant la stabilité du mélange de béton. Ces superplastifiants réalisent ceci avec un mécanisme de répulsion électrostatique en combinaison avec l'obstacle stérique (la figure 1.2).

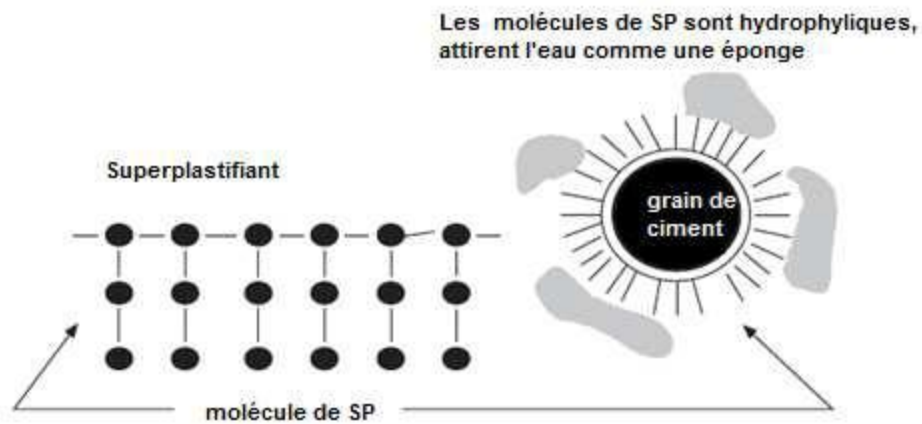


Figure 1.1 . Le mécanisme d'action du superplastifiant à base de polycarboxilate (ACI) [13].

Les superplastifiants récents sont les polycarboxylates qui assurent une meilleure défloculation de la suspension de ciment en solution aqueuse, ce qui améliore caractéristiques rhéologiques du mélange [13]. Les mécanismes responsables de cet effet sont encore discutés. En effet, les molécules organiques de ces superplastifiants, s'adsorbent à la surface des particules de ciment. La dispersion de ces particules, est obtenue par la répulsion électrostatique des molécules du polymère autour de la périphérie des grains et/ou par l'encombrement stérique de ces molécules, qui empêcherait les contacts entre les grains de ciment.

1.7.2.5 Les fibres

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci. Les fibres utilisées dans la confection des bétons sont classées en quatre grandes familles selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques :

- ✓ fibres minérales : verre, carbone ;
- ✓ fibres métalliques : acier, inox, fonte ;
- ✓ fibres organiques : polypropylène, acrylique ;
- ✓ fibres naturelles : Hévéa, Sisal ...

Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur...), formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres.

➤ **Le rôle des fibres.**

Augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- ✚ Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures.
- ✚ La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes.

1.8 Propriétés essentielles d'un mortier autoplaçant

1.8.1 L'ouvrabilité et la fluidité

Les essais développés dans cette partie s'apparentent beaucoup plus à des essais technologiques qui dépendent certes des propriétés rhéologiques du béton mais ne permettent pas de déterminer un seuil de cisaillement ou une viscosité plastique, paramètres fondamentaux de la rhéologie des fluides d'une manière générale.

1.8.1.1 Essais relatifs au Mortier à l'état frais

1) Essai d'Étalement au Mini-Cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenue. La figure 3.1 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

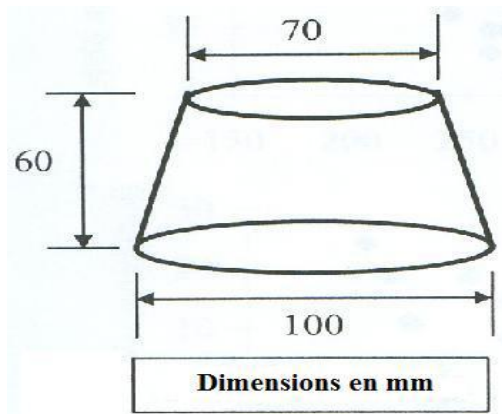


Figure 1.2. Essai d'Étalement pour Mortier

2) Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1L litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure 1.4).

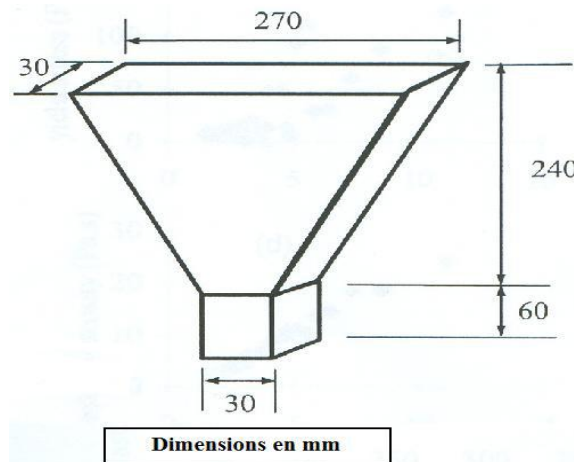


Figure 1.3 .Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier

Valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 s [14].

1.8.1.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression est considérée comme la plus importante des propriétés sur laquelle repose la conception d'une structure, elle donne une indication sur la qualité du béton puisqu'elle est liée directement à la structure de la pâte de ciment hydraté.

Parmi les facteurs qui influent sur la résistance à la compression :

- le rapport **Eau/Ciment** dont elle est inversement proportionnelle [15], les moyens de serrage disponibles et l'adjonction des ultrafines telles les fumées de silice, ou encore l'ajout d'un superplastifiant qui fait augmenter la résistance. Le squelette granulaire ainsi que le type de ciment, influent également sur la résistance finale du béton de plusieurs façons :
- Par les qualités mécaniques des granulats et leur capacité d'adhérence avec la pâte liante.
- Par la composition du type de ciment utilisé : la résistance d'un béton sera d'autant plus élevé que le ciment sera plus résistant.

1.8.1.3 Retrait

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent ; c'est le retrait. On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4×4cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50% [16].

La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- 800µm/m pour les ciments portland CPA-CEM I ET CPJ-CEMII de classe 32,5R.
- 1000µm/m pour des types de ciment identique mais des classes 32,5R-42,5 et 42,5R.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- la nature du ciment ;
- la finesse de mouture ;
- le dosage en ciment, dans le mortier ;
- le dosage en eau ;
- la propreté et nature des granulats ;

1.8.1.4 Module de Déformation Longitudinal

Comme la grande masse du volume de béton est représentée par les agrégats, le type et la quantité de ces derniers ainsi que les modules d'élasticité ont la plus grande influence sur le module d'élasticité du béton. En choisissant des agrégats ayant un module élevé augmentera le module d'élasticité du béton. Par contre, un béton ayant un grand volume de pâte pourrait affaiblir la valeur du module d'élasticité du béton. Parce que les bétons autoplaçants ont un grand volume de pâte, leurs modules d'élasticités peuvent être, en quelque sorte, plus faibles que ceux des bétons ordinaires.

[17] ont trouvé que, d'une part et malgré qu'avec un rapport E/C élevé, les BAP présentaient une meilleure résistance à la compression que les bétons ordinaires, d'autre part la quantité plus élevée de pâte dans les BAP a généré une réduction dans le module d'élasticité par rapport au béton ordinaire.

[18] attestent que le module d'élasticité est proportionnel à la racine carrée de la résistance à la compression et que plus la résistance est élevée plus le module d'élasticité est élevé. Or ceci, d'après les auteurs, ne peut être valable que si le seul paramètre est le rapport eau/poudre. Le module d'élasticité des bétons à haute performance est influencé par les constituants du mélange. Ainsi à jeune âge le taux de gain du module d'élasticité est plus élevé que celui de la résistance quand le mélange comporte des additions minérales. Le module d'élasticité des BHP utilisant le laitier et la fumée de silice augmente avec l'âge, et le taux d'augmentation devient moindre à l'approche de 28 jours, plus encore l'addition des cendres volantes réduit le taux d'augmentation du module d'élasticité avec l'âge. Avant eux Persson [19] avait trouvé que le module d'élasticité, le fluage et le retrait du BAP ne diffèrent pas significativement de celles du béton ordinaire quand la résistance est constante. [20] ont montré que les mélanges de BAP ont des modules d'élasticité faibles comparés à ceux du béton traditionnel. En général cette tendance peut être attribuée à la faible quantité de gros granulats et la grande quantité de la pâte.

1.9 Mortier de réparation

Ce sont des produits nouveaux utilisés pour la réparation des ouvrages en béton. Un mortier autoplaçant désigne un mortier faisant partie d'un système de réparation du béton, dont l'objet est de réparer des dégradations ou défauts, dus à une mise en œuvre ou un comportement déficient du béton, ou encore à des sollicitations mécaniques, physiques ou chimiques. Le mortier autoplaçant destiné à la réparation il faut répondre à la conduite suivant :

- Aspect économique et environnemental : Valorisation des matériaux locaux (sable, poudre de marbre & fumée de silice ...).
- Aspect de compatibilité : Module d'élasticité maximal, retrait minimal.
- Aspect de durabilité : Résistance, Imperméabilité,

1.10 Principe de réparation

Avant de s'engager dans la réparation d'un ouvrage présentant des défauts et/ou des désordres de béton, il est donc indispensable de procéder au diagnostic et à la détermination de leurs

causes. Mais il faut également définir l'objectif de la réparation et/ou les fonctions attendues du produit qui sera appliqué.

Pour obtenir une réparation durable des ouvrages en béton, il faut avant tout faire un choix judicieux des matériaux et des techniques de réparation en fonction des conditions de service et d'application.

1.10.1 Principe d'une réparation durable

De nombreuses méthodes existent pour réparer durablement un parement en béton, arrêter la progression des dégradations et éviter de nouveaux désordres. Leur utilisation suppose une mise en œuvre attentive, un contrôle des résultats et une surveillance adaptée.

La fabrication d'une réparation durable et efficace repose sur :

- Sélection appropriée des matériaux.
- Utilisation des matériaux suivant les règles de l'art.
- Préparation des surfaces.
- Techniques d'application.
- Contrôle qualité.
- Notions de bases sur la compatibilité des matériaux de réparation avec le béton

La compatibilité se définit comme un équilibre entre les propriétés physiques, chimiques et électrochimiques du matériau de réparation et du vieux béton existant.

Facteurs influençant la stabilité dimensionnelle

- Retrait de séchage
- Coefficient de dilatation thermique
- Module d'élasticité
- Fluage

La compatibilité dimensionnelle est un des paramètres les plus importants de la durabilité des réparations.

Une incompatibilité dimensionnelle peut affecter la durabilité ou la capacité structurale d'une réparation [21].

1.11 Conclusion

Aujourd'hui, il est impossible de confectionner un béton spécial (BHP, BAP) sans l'introduction de produits additifs conduisant à améliorer certaines de ses propriétés. Les additions organiques et minérales disponibles doivent être caractérisées et sélectionnées pour apporter leurs contributions sur l'amélioration des propriétés rhéologiques, mécaniques ou de durabilité.

Chapitre 2. Notions de base sur la rhéologie

2.1 Introduction

La Rhéologie est la science qui étudie la déformation, l'écoulement de la matière sous l'action de contraintes appliquées. Le terme rhéologie a été introduit en 1920 par Eugene Bingham, professeur à l'université de Lehigh. Cette science intègre aussi l'étude des substances liquides ou solides en englobant de nombreuses disciplines fondamentales telles que la résistance des matériaux, la mécanique des fluides newtoniens, la plasticité, ...etc. Il est dit qu'un élément est en écoulement si le degré de sa déformation change constamment en fonction du temps [15] cette déformation est due à des changements de forme et de dimensions sous l'action d'une charge appliquée. Cette charge appelée force de cisaillement provoque la rupture des liaisons inter-granulaires des différents constituants de l'élément et déclenche par la suite son écoulement, c'est le seuil de cisaillement. [22]

Dans le domaine de construction, la connaissance du comportement rhéologique ou bien des propriétés rhéologiques a une importance cruciale, étant donné que les propriétés du béton frais telles que la déformabilité, la résistance à la ségrégation et sa mise en place (transport, pompage, collage et vibration) sont affectées par son comportement rhéologique.

En outre, la qualité du béton durci est aussi influencée par le comportement rhéologique du béton frais. L'étude du comportement rhéologique d'une matière quelconque nécessite de trouver la relation entre la contrainte de cisaillement (τ) et le taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) d'où on peut déduire. [23]

2.2 Importance de l'étude rhéologique

Bien que 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 pompabilité, 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.

Les tests empiriques conventionnels ne suffisent plus pour certains cas à bien caractériser le comportement lors de l'écoulement et de la mise en place du béton frais. Le développement de nouveaux appareils basés sur une approche plus fondamentale et rhéologique donne des résultats plus adéquats et reflète bien l'aptitude physique du matériau à se déplacer sous son propre poids. [24]

2.3 Définition des propriétés rhéologiques

2.3.1 Viscosité

On considère idéalement un liquide au repos comme un ensemble de couches moléculaires parallèles soumise à une contrainte tangentielle. Si une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente (Figure 2.1), en raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement à cette dernière en même temps que la vitesse de déplacement de la première couche diminue.

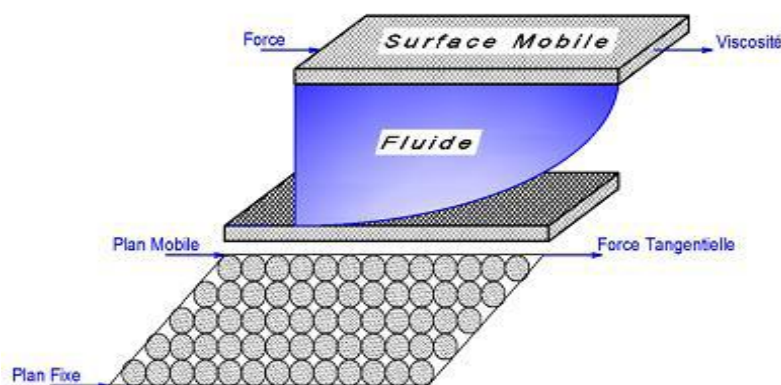


Figure 2.1. Schéma glissement des couches.

Cet effet de retard, provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé viscosité μ [Pa.s]. Donc, la viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte

tangentielle. Elle est caractérisée par un coefficient de viscosité qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Pour certains fluides, sa connaissance suffit à caractériser de façon précise son comportement rhéologique [25].

Il existe quatre types de viscosité énumérés dans le tableau 2.1 [26]

Tableau 2-1. Définitions des viscosités [26].

Type de viscosité	Définition	Expression	dépendance
Viscosité dynamique η	Résistance au mouvement due aux frottements moléculaires internes, résistance que les molécules de ce fluide opposent aux forces de dissociation et au mouvement	Pour un fluide idéal, la loi de Newton donne: $\tau = \eta \dot{\gamma}$ (Pa.s) Pour les fluides dits non-Newtoniens la grandeur est la viscosité apparente	Essentiellement de la cohésion et du taux de transfert de quantité de mouvement entre les molécules
Viscosité cinétique ν	Doit son origine à l'utilisation des viscosimètres capillaires utilisant le temps d'écoulement sous l'effet de la pesanteur, qui intègre la masse spécifiques de la substance	Temps d'écoulement $\nu = \eta/\rho$ avec ρ la densité du liquide et η sa viscosité (en stokes ou m ² /s)	De la densité du liquide et de sa viscosité
Viscosité Relative η_R	Correspond au rapport de la viscosité dynamique de cette solution sur la viscosité dynamique du solvant	$\eta_R = \eta / \eta_s$	
Viscosité spécifique η_{sp}	Correspond à la viscosité d'une dispersion colloïdale diluée de particules sphériques	$\eta_{sp} = \eta_R - 1$	

2.3.2 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 [23]. Donc, on peut dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide :

$$\tau = dF / dS \dots\dots\dots \text{Équation 2-1}$$

Où :

d F : projection de la force de frottement tangentielle.

dS : surface élémentaire d'une couche cisailée.

2.3.3 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 2.2).

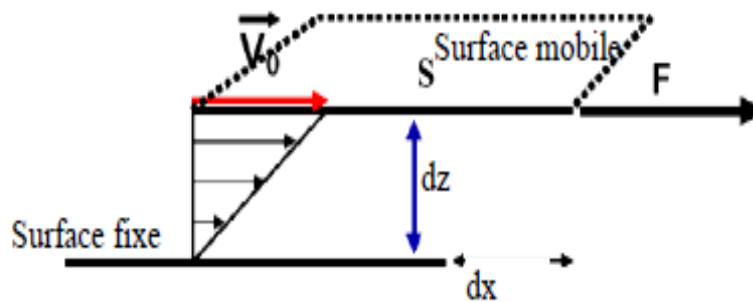


Figure 2.2. Schéma de vitesse de cisaillement.

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 :

$$\gamma = dx / dz \dots \dots \dots \text{Équation 0-2}$$

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. [23]

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz} \dots \dots \dots \text{Équation 0-3}$$

2.3.4 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. [25] 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 (Figure2.3).

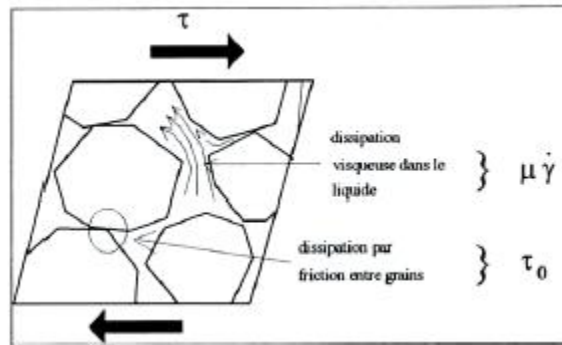


Figure 2.3. Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [25].

2.3.5 Thixotropie

La thixotropie étant un comportement dépendant du cisaillement et du temps, il est souhaitable de maintenir l'un des facteurs constant (le cisaillement) et observer l'évolution de la structure en fonction du temps. Particulièrement, la thixotropie de la pâte de ciment est un domaine mal compris, mais assez important dans son application sur le chantier. Lors du transport ou du coulage du béton, ce dernier va supporter une certaine agitation physique (ou bien on peut dire qu'il est en train de cisailer) ce qui provoque la diminution de la viscosité du béton, mais lorsque le béton arrive au chantier ou la mise en œuvre est terminée, on a besoin que la viscosité du béton reprend son état initial pour éviter la sédimentation des granulats. Donc, la thixotropie de la pâte est un des paramètres très importants dans l'ouvrabilité du béton. [26]. Dans le cas contraire, on dit qu'il est antithixotrope. Ces deux phénomènes sont caractérisés dans la Figure 0.4. Il faut noter que la thixotropie, ainsi que antithixotropie, sont définies comme étant des phénomènes réversibles [8].

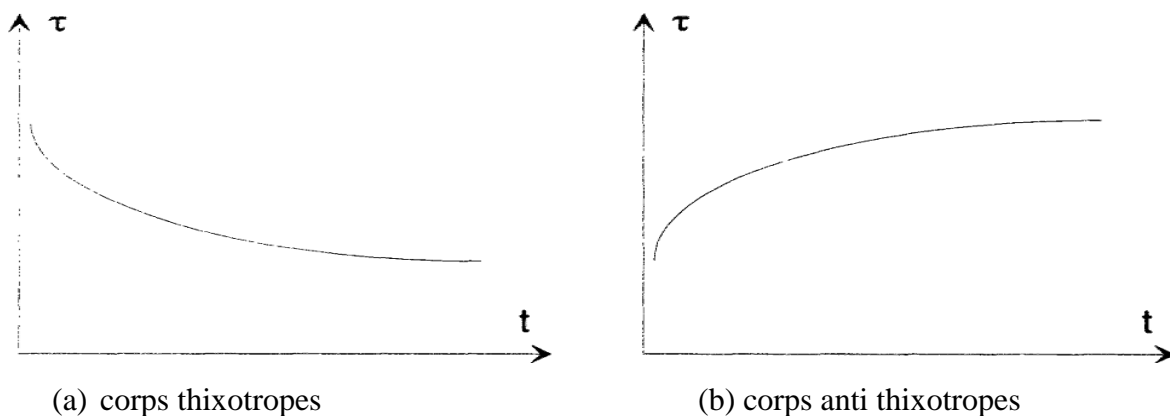


Figure 0.4. Phénomènes thixotrope et anti thixotrope [27]

2.4 Types de comportements rhéologiques

La rhéologie est une science qui traite de l'écoulement en phase fluide et de ce fait, elle permet de prédire le comportement d'un matériau considéré comme un milieu continu pour lequel les équations de la mécanique des fluides sont applicables. Le principe de base est de soumettre le matériau à un cisaillement et d'étudier les contraintes et les déformations subies par ce dernier. En reliant ces paramètres, on arrive à définir des rhéogrammes souvent appelés courbes d'écoulement qui sont fonction de la contrainte de cisaillement (τ) et de la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$).

On distingue deux types de courbes d'écoulement caractérisant les comportements rhéologiques des fluides : comportement linéaire et comportement non linéaire. La figure (2.5) regroupe les différents types de comportement rhéologique [28].

2.5 Courbes de comportement linéaires

Les comportements d'écoulement linéaires regroupent les corps Newtoniens exclusivement visqueux qui ne nécessitent pas d'atteindre une certaine valeur de contrainte de cisaillement pour pouvoir s'écouler. Leur viscosité apparente est constante (Figure 2.5 – courbe 2a). On trouve aussi les corps Binghamien viscoplastiques qui nécessitent une contrainte minimale appelée seuil de cisaillement (τ_0) non nulle, au-delà de laquelle on observe un écoulement de la matière. Leur viscosité apparente décroît lorsque la vitesse de cisaillement augmente (Figure 2.5 – courbe 1a).

2.6 Courbes de comportement non linéaires

Les comportements d'écoulement non linéaire regroupent les corps complexes exclusivement visqueux ou viscoplastique, mais ayant des modèles de comportement non linéaires avec et sans seuil de cisaillement. On distingue deux types de comportement : le comportement rhéofluidifiant qui correspond à la diminution de la viscosité au fur et à mesure que la vitesse de cisaillement à laquelle est soumis un fluide augmente. Il apparaît pour un indice $n < 1$ (Figure 2.5 – courbes 1b et 4b). Le comportement rhéoépaississant correspond à l'augmentation de la viscosité en fonction de l'augmentation de la vitesse de cisaillement. Il apparaît pour un indice $n > 1$ (Figure 2.5– courbes 2b et 3b). Ces comportements sont souvent

décrits par des modèles obéissant à des lois de puissance, la plus commune étant celle d’Herschel-Bulkley [24].

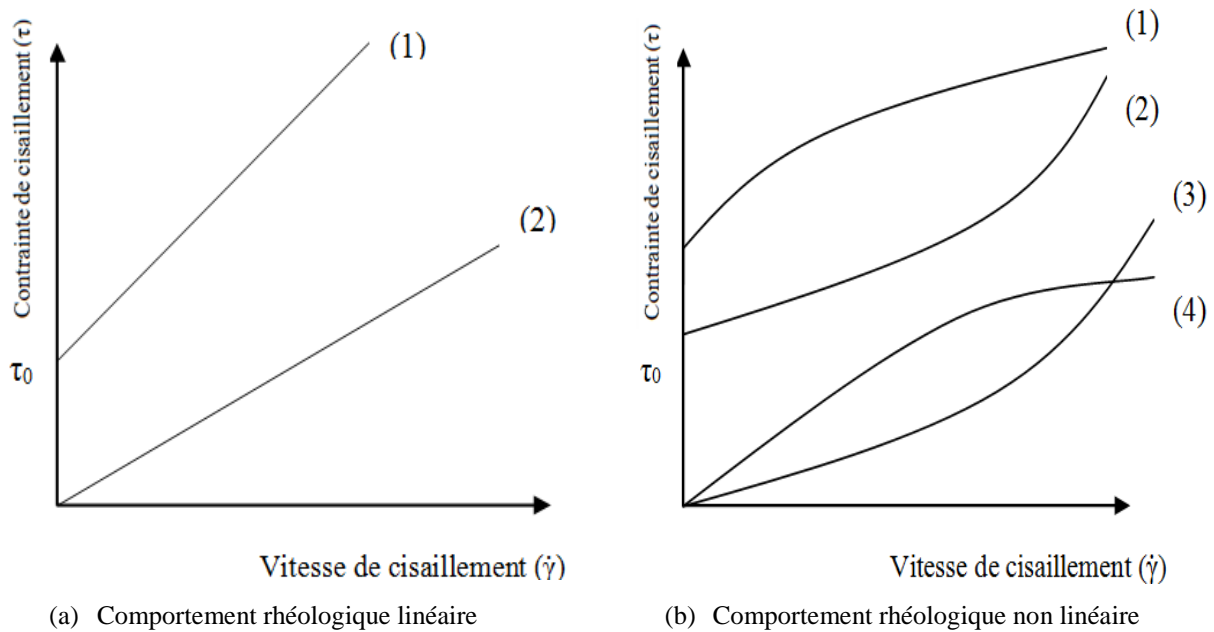


Figure 2.5. Différents comportements rhéologiques [29].

Il existe dans la littérature [30] toute une panoplie de modèles décrivant des comportements qui obéissent à des lois de puissance, cependant, dans la pratique, les plus répandus sont les modèles de Bingham et d’Herschel-Bulkley.

Afin de modéliser un comportement rhéologique d’un béton frais ordinaire ou à haute performance, on a recours généralement au modèle de Bingham [31 ;32] ce modèle ne comprend que deux paramètres à ajuster (τ_0 et μ) [33]. L’équation (2.4) décrit le modèle de Bingham.

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \dots \dots \dots \text{Équation 2-4}$$

Avec :

- τ : Contrainte de cisaillement (Pa),
- τ_0 : Seuil de cisaillement (Pa),
- $\dot{\gamma}$: Gradient de vitesse (s-1),
- μ : Constante appelée, viscosité plastique de Bingham (Pa.s).

Cependant, certains auteurs [34.35] affirment que les BAP n’obéissent pas forcément aux modèles linéaires de Bingham, ceci est dû à l’extrapolation du seuil d’écoulement qui peut être négatif. Ce qui est confirmé par d’autres auteurs [34 ; 36 ; 37]. Rapporte que les

pâtes à base de superplastifiant convergent vers un comportement non linéaire rhéoépaississant selon le modèle d’Herschel-Bulkley, décrit par l’équation ci-dessous:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \dots\dots\dots\text{Équation 0-5}$$

Avec :

τ : Contrainte de cisaillement (Pa),

τ_0 : Seuil de cisaillement (Pa),

$\dot{\gamma}$: Gradient de vitesse (s⁻¹),

k : Coefficient de viscosité,

n : Indice du modèle.

De Larrard et al. [34] ont proposé un modèle de Bingham modifié, issu de l’exploitation des mesures rhéologiques selon le modèle d’Herschel-Bulkley. D’après leurs études, ils ont montré que les deux paramètres k et n du modèle d’Herschel-Bulkley étaient liés et de ce fait, le modèle ne contenait que deux paramètres indépendants, facilitant ainsi son utilisation. La valeur du seuil d’écoulement obtenue par le modèle d’Herschel-Bulkley est conservée, cependant, la courbe d’écoulement est remplacée par une droite obtenue par une régression linéaire. La viscosité plastique est fonction des deux paramètres k et n d’Herschel-Bulkley, son expression est donnée par l’équation (2.6) :

$$\mu = \frac{3K}{n+2} \dot{\gamma}^{(n-1)} \dots\dots\dots\text{Équation 0-6}$$

Avec :

μ : Viscosité plastique (Pa.s),

$\dot{\gamma}$: Gradient de vitesse (s⁻¹),

k : Coefficient de viscosité,

n : Indice du modèle.

La figure (2.6) représente les courbes d’écoulement des trois modèles présentés ci-dessus :

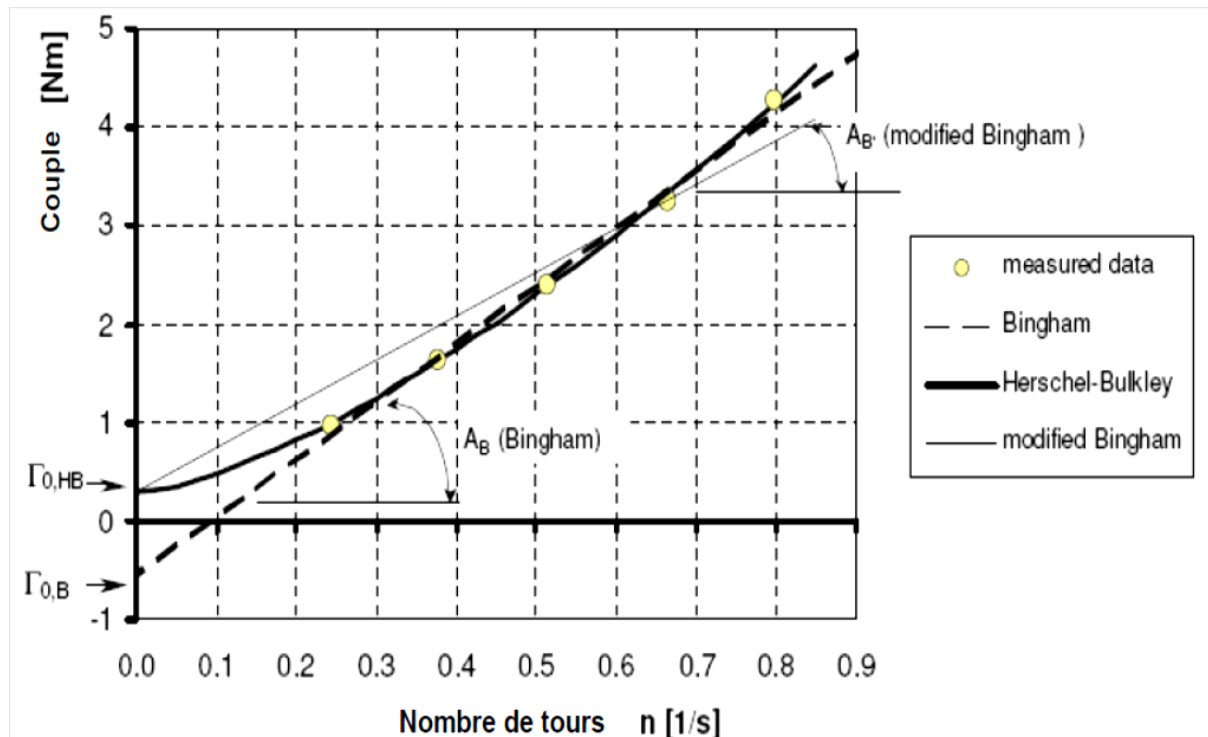


Figure 2.6. Différents modèles rhéologiques [38].

2.7 Rhéologie des matériaux de Génie Civil

La connaissance du comportement rhéologique est essentielle pour caractériser l'écoulement d'un béton. Le béton peut être décrit comme une suspension de particules de différentes tailles, constituée d'une phase solide et d'une phase liquide. La définition des phases solides et liquides peut varier selon l'approche ou l'échelle de taille des particules. On peut considérer par exemple du gravier (phase solide) et du mortier (phase liquide) ou à une échelle différente, du granulats et de la pâte. Lorsqu'on étudie la rhéologie de la pâte, on peut considérer l'ensemble des fines (phase solide) baignant dans l'eau (phase liquide). Ainsi, le comportement rhéologique peut être étudié à différents niveaux : le béton, le mortier, la pâte et le fluide (mélange de l'eau et des adjuvants qui contiennent une fraction de molécules).

2.8 Etude rhéologique des mortiers autoplaçants

Le fait que les propriétés des BAP sont généralement liées aux celles de leurs mortiers autoplaçants (MAP). Il est intéressant d'étudier le comportement rhéologique des bétons autoplaçant sur des mortiers autoplaçants. Cette démarche présente l'avantage de rendre les essais moins lourds vue que le volume du matériau requis devient plus faible.

Dans le BAP, la phase du mortier est une phase très importante car elle fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant, il doit répondre à deux exigences essentielles : présenter une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statique et dynamique. En termes de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange. A cet égard pas mal de recherches ont été faite dont les auteurs ont étudiés la rhéologie des mortiers autoplaçants partent de formulation, l'influence des ajouts minéraux et de superplastifiant, ainsi que la résistance mécanique. Ce pondant nous citons quelques travaux. D'après la littérature, plusieurs chercheurs ont évalué la fluidité du mortier par les essais empirique étalement au mini cône et l'essai de l'entonnoir (V-funnel) car il existe une corrélation entre ces essais et mesures rhéologique effectuées par un rhéomètre.

Le contrôle de la qualité de mortier en centrale impose des tests d'étalement, et plus rarement des tests au rhéomètre à mortier. Néanmoins, les mesures empiriques conduisent à des estimations de seuil de cisaillement d'un mortier pour l'étalement et ainsi qu'à des estimations de viscosité apparente pour le V-Funnel. Nous exploiterons ces méthodes pour caractériser de façon traditionnelle le comportement rhéologique de mortier.

2.9 Appareils de mesure rhéologique

Les rhéomètres sont des appareils utilisés pour déterminer le comportement rhéologique des matériaux.

2.9.1 Définition de rhéomètres

Le rhéomètre C'est un appareil de laboratoire capable de faire des mesures relatives à la rhéologie d'un fluide, qui est l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte extérieure. Il applique un cisaillement à l'échantillon. Généralement de faible dimension caractéristique (très faible inertie mécanique du rotor), il permet d'étudier fondamentalement les propriétés d'écoulement d'un liquide, d'une suspension d'une pâte, etc., en réponse à une force appliquée.

2.9.2 Mesures

Un rhéomètre est plus sophistiqué qu'un viscosimètre. Certains modèles permettent, en appliquant une sollicitation sinusoïdale (mode oscillation), de déterminer les grandeurs viscoélastiques intrinsèques de la matière, qui dépendent notamment du temps (ou de la vitesse angulaire ω) et de la température. Sont par exemple mesurés :

- La viscosité dynamique, μ ou η , en fonction du taux de cisaillement (tracé de la courbe de viscosité), de la température, du temps, etc. ;
- La contrainte tangentielle τ en fonction du taux de cisaillement (courbe d'écoulement) ; en mode oscillation (essai dynamique) ;
- La viscosité complexe η qui est comparable à la viscosité en rotation ;
- Le déphasage entre la force et le déplacement, appelé angle de phase ou angle de perte δ et le facteur d'amortissement $\tan \delta$, pour la détermination de transitions .L'appareil permet notamment d'évaluer le seuil d'écoulement selon Bingham (relié à l'application du produit), la thixotropie (destruction – restructuration d'une matière), la stabilité des mesures de viscosité sous cisaillement, le fluage, la recouvrance, la relaxation de contrainte, la dégradation [39]. Il décrit le comportement de l'échantillon à l'état liquide (plus ou moins visqueux) ou pâteux, à la limite du solide. Le rhéomètre permet d'étudier l'effet des propriétés des particules d'une suspension [concentration (fraction volumique Φ) (équation de Krieger-Dougherty), taille, distribution de taille, forme et charge des particules] sur les propriétés rhéologiques.

2.9.3 Type du rhéomètre

Les rhéomètres sont des outils élaborés pour caractériser la rhéologie des bétons frais. Souvent inadaptés aux conditions de chantier (difficulté de transport et d'utilisation notamment) leur utilisation est destinée à une mesure en laboratoire.

Il existe une grande variété de rhéomètres à bétons :

- ❖ rhéomètres agitateurs-malaxeurs (IBB, ICAR, LGCGM, Two-point test)
- ❖ rhéomètres à cylindres coaxiaux (BML, Cemagref)
- ❖ rhéomètre plan-plan (BT Rhéom).



Figure 2.7. Rhéomètres à bétons existants : BML (a) ; BT Rhéom (b) ; Cemagref (c) ; IBB (d) ; ICAR ; Two point test (f)

2.10 Facteurs affectant la rhéologie des mortiers autoplaçants.

Le mortier autoplaçant correspond à l'ensemble ciment, additions, eau efficace, air, adjuvants. Chacun de ces éléments joue un rôle différent dans le comportement du mortier frais, l'étude du comportement rhéologique de l'ensemble devient particulièrement difficile si on désire la conduire en analysant l'influence de tous les éléments.

2.10.1 Effet du rapport eau/ciment

Normalement, l'augmentation du rapport E/C diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique [25]. Les auteurs qui ont noté cet effet ont souvent réalisé une gâchée de béton à un faible rapport E/C et par la suite ajouté successivement des quantités d'eau. La quantité de pâte de ciment n'est donc pas constante lors que le rapport E/C varie. Effectivement, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent avec l'augmentation du rapport E/C. La figure 2.8 montre l'influence du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques du béton [14].

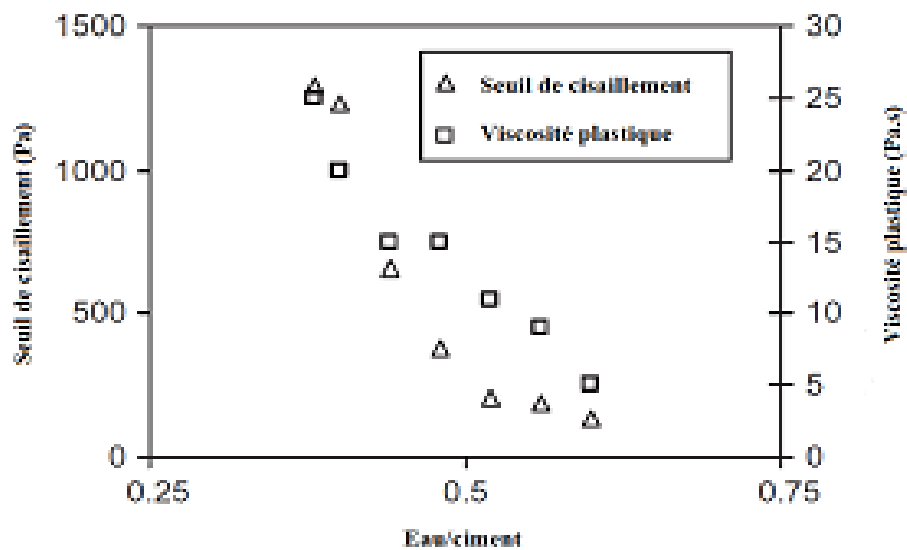


Figure 2.8. Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons [14].

2.10.2 Effet du type de ciment

L'influence de la composition du ciment Portland sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires a été largement étudiée. Beaupré et Mindess [39] ont effectué des essais avec trois types de ciment. Quand tous les autres paramètres sont constants, un mélange fabriqué avec du ciment type 50 montre le plus faible seuil de cisaillement ; un mélange fait avec du ciment type 10 avec de la fumée de silice montre le plus grand seuil de cisaillement et un mélange fait avec du ciment type 10 présente un seuil de cisaillement compris entre les deux précédents. Généralement ces résultats donnent une viscosité plastique pratiquement constante. Asakusa et al. [40] ont constaté que la viscosité des pâtes de ciment augmente sensiblement dans le ciment ayant un faible rapport C_3S/C_2S ou C_3A/C_4AF lorsqu'un superplastifiant de PNS est employé.

2.10.3 Effet des adjuvants

Dans une étude du temps d'introduction des superplastifiants sur les propriétés rhéologique des pâtes de ciment, il a été constaté que les superplastifiants à base de naphthalène et de mélamine augmentent les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment à court et à long termes et que la réduction de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement dépendent de la composition du ciment et du temps d'introduction du superplastifiant. Bethmont [41] a également étudié le mécanisme de ségrégation des bétons autoplacants. Elle a constaté que l'effet du superplastifiant au-delà du dosage de saturation produit une ségrégation et un ressuage dont le volume d'eau de ressuage augmente lorsque le dosage en superplastifiant

augmente. Hu [33] a étudié l'effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques d'un béton à dosage en eau constant. Les résultats représentés sur la figure 2.9 montrent que le superplastifiant diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, par contre son effet sur la viscosité reste modeste après un certain dosage.

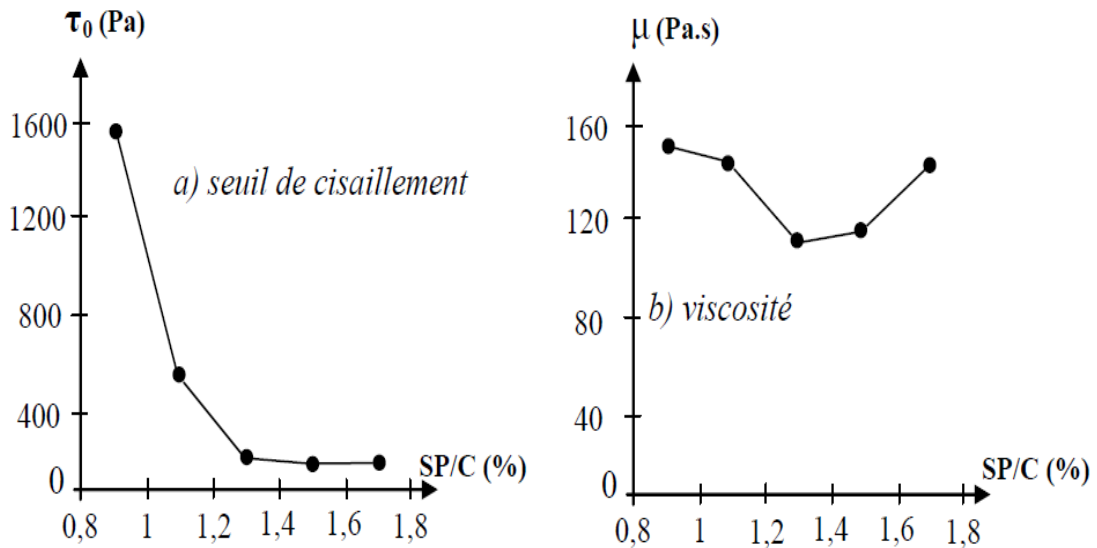


Figure 2.9. Effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques [33].

2.10.4 Effet des additions minérales

Les substances minérales utilisées comme ajouts en cimenterie ou additifs lors de la confection du béton contribuent par leur activité physique, hydraulique et pouzzolanique à améliorer le comportement des ciments à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Plusieurs types d'ajouts sont bien connus tels que les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, les laitiers des hauts fourneaux ainsi que la fumée de silice. Ces produits deviennent plus actifs dans les solutions alcalines du ciment et donnent naissance à de nouveaux hydrates qui confèrent aux bétons une plus grande résistance mécanique et une meilleure durabilité [42]. Par leur activité de surface et leur distribution granulaire, ils jouent un rôle fondamental dans le comportement rhéologique du béton. Zhang et Han [43] étudient l'effet des additions ultrafines sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment et constatent que le seuil de cisaillement augmente avec la quantité d'addition ultrafine incorporée tandis que la viscosité de la pâte varie avec la nature et la quantité d'addition. Lorsque le taux de substitution du ciment par des additions de fumée de silice, cendres volantes ou calcaires est inférieur à 15%, la viscosité de la pâte est remarquablement réduite. Ceci n'a pas été noté pour les additions de laitier.

2.10.4.1 L' influence de poudre de marbre

La poudre de marbre c'est un déchet résultant de coupage, façonnage et lustration des pierres de marbres. Comme tous les ajouts incorporé dans le mortier autoplaçant, elle influencé positivement les propriétés rhéologique des MAP.

Belaidi et al. [44] a étudié l'incorporation de la poudre de marbre dans le mortier autoplaçant.il a conclu que la substitution du ciment avec des teneurs de poudre de marbre de 5 à 30% ont apporté un effet bénéfique sur le comportement rhéologique des mortiers autoplaçant.

Cependant Boukhalkhal [45] a confirmé que l'injection de poudre de marbre dans les BAP conduit non seulement à une diminution du seuil de cisaillement, mais aussi la viscosité plastique ; Comme il a fait part que la substitution de 20% de ciment par de la poudre de marbre est le plus efficace, autant pour la déformabilité, la capacité de passage, la résistance à la ségrégation et l'ouvrabilité que pour la rhéologie.

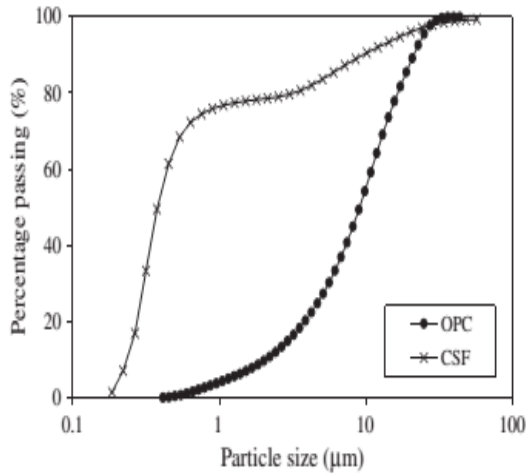
Dada et Lamri [8] on a dit la substitution de la poudre de marbre seule à apporter un effet bénéfique sur l'ouvrabilité des mortiers autoplaçants (MAP) avec une diminution de seuil de cisaillement significative et une fluidité exprimé par sa faible viscosité.

2.10.4.2 L' influence de fumée de silice

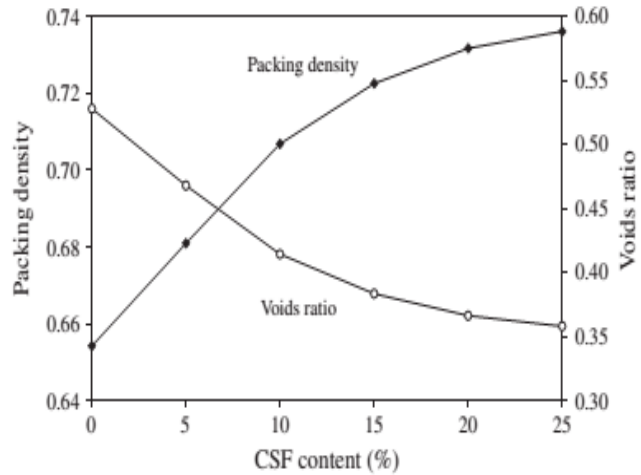
L'influence de la fumée de silice sur le comportement rhéologique ne fait pas l'unanimité des auteurs. Des études [15 ; 30] ont montré que la fumée de silice augmente le seuil de cisaillement et la viscosité, en augmentant la compacité des mélanges. Tandis que Carlsward *et al.* [46] rapporte que l'ajout de la fumée de silice ne modifie pas la viscosité. D'autres études réalisées par révèlent une demande en eau et en superplastifiant plus importante, due à l'utilisation de la fumée de silice par comparaison avec un mélange de référence. Cette observation est valable aussi bien pour des pâtes de ciment que pour des bétons [3].

Chen et *al.* [47] ont montré que l'action des additions minérales sur l'ouvrabilité du béton et encore plus marquée par leur distribution granulaire ou certaine additions minérales comme la fumée de silice possède une distribution granulaire différente à celle du ciment (figure 2.10.a) qui améliore la compacité de la matrice cimentaire et réduit le volume des

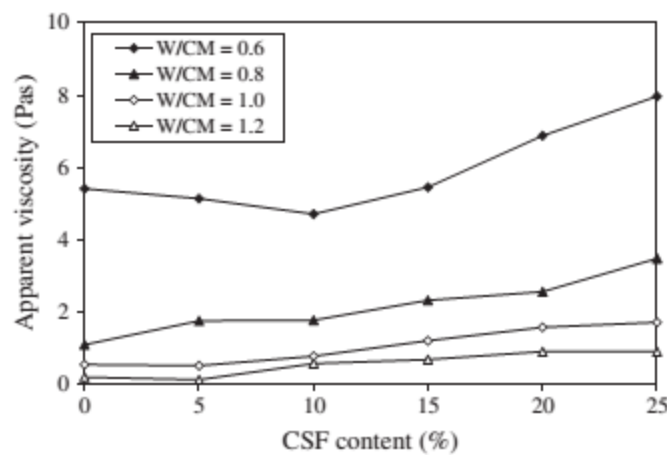
vides (figure 2.10.b). L'amélioration de la compacité induit une libération de l'eau et diminue l'effet négatif de la finesse de la fumée de silice sur les paramètres rhéologiques (figure 2.10.c).



a) distribution granulaire



b) variation de la compacité



c) viscosité

Figure 2.10. Effet de la distribution granulaire de la fumée de silice sur la variation de la viscosité [47].

2.10.5 Effet des fibres

Les études de l'effet de l'ajout de fibres sur la rhéologie du béton frais montrent que le comportement des bétons est Binghamien. Ses résultats montrent que lorsque la quantité de fibres augmente, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement augmentent aussi. Lorsque la longueur des fibres augmente, seul le seuil de cisaillement augmente. L'addition des fibres a une influence directe sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur

l'ouvrabilité des MAP. D'après Groth [48], cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élanement.

2.11 Conclusion

L'objectif dans Cette synthèse bibliographique était de donner un état d'avancement des travaux et des connaissances acquises sur la rhéologie des MAP, on a compris un peu tous les paramètres qui concernent le comportement rhéologique et les types de comportement. vitesse de cisaillement, contrainte de cisaillement,

Chapitre 3. Caractérisation des matériaux ; formulations et expérimentations

3.1 Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre programme de recherche. La caractérisation des matériaux de construction tels que la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. 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, c'est l'objet de ce chapitre. Ensuite une série d'essais est réalisée sur le mortier à l'état frais afin de pouvoir étudier l'ouvrabilité et la rhéologie du mortier. Cette série est suivie par des essais sur le mortier durci pour déterminer les résistances mécaniques et retrait des mélanges à l'état durci. On notera que tous les essais mentionnés ci-dessous ont été réalisés au laboratoire de recherche en génie civil à l'Université Amar Telidji à Laghouat.

3.2 Caractérisation des matériaux

3.2.1 Sable

3.2.1.1 Granulométrie

L'essai de l'analyse granulométrique tableau 3.1 et figure 3.1 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) 5 ; 2.5 ; 1.25 ; 0.63 ; 0.315 ; 0.16 ; 0.08.



Figure3.1. Tamiseuse électrique.

Tableau3-1.L'essai de l'analyse granulométrique

Echantillon : sables alluvionnaire				
Référence dossier : NFP 18-560 [19]			température : 25° C	
M= 2000 g				
Dimension des tamis (mm)	Masse refusée partielle (g)	Masse refusée cumulée (g)	Le refus cumulé (%)	Passant (%)
5	0.2	0.2	0.01	99.950
2.5	78	78.2	3.918	96.082
1.25	104	182.2	9.128	90.870
0.63	316	498.2	24.959	75.040
0.315	724	1222.2	61.232	38.768
0.16	688	1910.2	95.70	4.298
0.08	74	1984.2	99.408	0.591
Le reste	18	1996.0	100	0

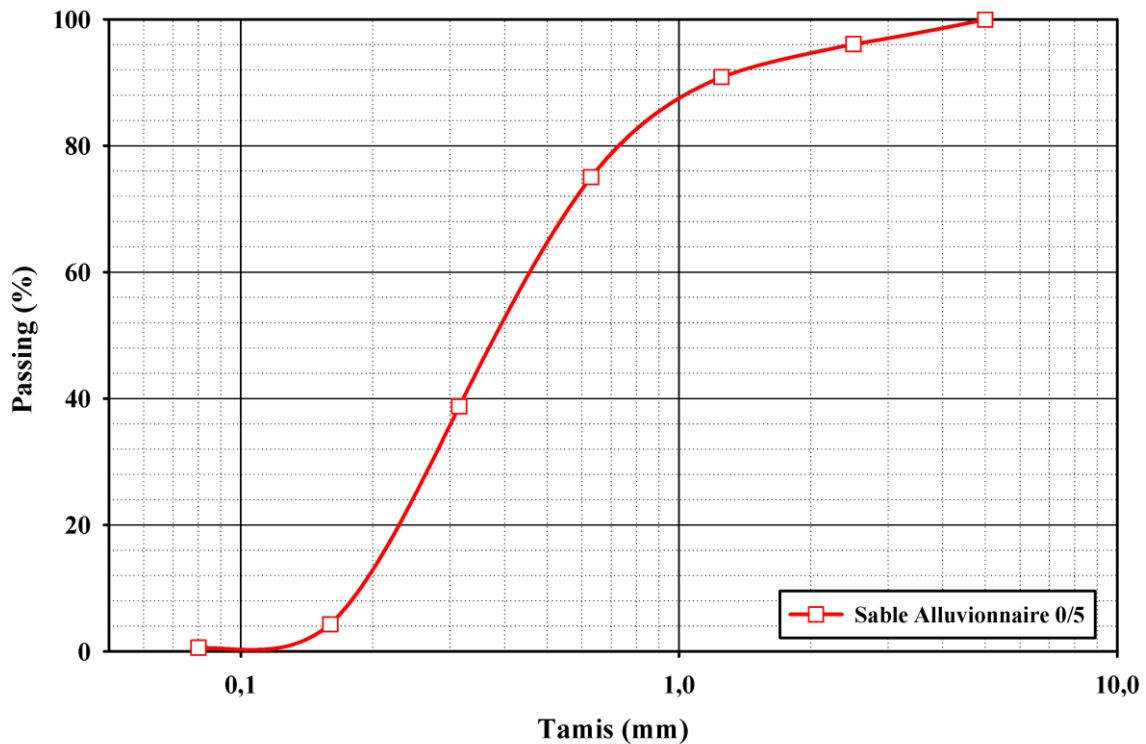


Figure 3.2. Courbe granulométrique du sable alluvionnaire de Laghouat

3.2.1.2 Module de finesse

Le module de finesse M_f d'un sable est égal au centième (1/100) de la somme des refus cumulés exprimé (en % sur les tamis de module 23, 26, 29, 32, 35, 38) Ce paramètre utilisé pour caractériser la finesse des sables. Le module de finesse donné par la relation suivante :

$$M_f = \frac{\sum \text{refus cmulée } \%}{100} \dots \dots \dots \text{Équation3-1}$$

Dans notre cas les résultats des essais effectués sur le sable alluvionnaire donnent le valeur suivante : $M f = 2.94$

3.2.1.3 Masses volumiques

3.2.1.3.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est calculée d'après la norme NFP18-555. C'est et le rapport de la masse d'échantillon (m) sec sur le volume total apparent (V_{tot})

- $V_{tot} = \text{volume des grains} + \text{volume de vide}$
- La masse volumique apparente (γ_{app})

est donnée par la relation suivante :

$$\gamma_{app} = \frac{m}{V_{tot}} \quad \text{..... Équation 0-2}$$

Pour notre cas : $\gamma_{app} = 1.54g/cm^3$

3.2.1.3.2 Masse volumique spécifique

On entend par masse spécifique la masse de l'unité de volume absolue d'un corps (volume matière plein). La Masse volumique spécifique du gravillon peut être calculé par la formule

suivant :

$$\gamma_{abs} = \frac{M_a}{V_s} \quad \text{..... Équation 0-3}$$

M_a : la masse de sable a l'aire

V_s : $V_2 - V_1$, volume absolue de sable

V_1 : Volume d'eau initial

V_2 : Volume d'eau après l'introduction de l'échantillon.

Dans notre cas nous avons, nous avons trouvé que : $\gamma_{abs} = 2.66g/cm^3$

3.2.1.4 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 [49] à l'aide de la formule suivante :

$$E_s = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100 \quad \text{.....Équation 0-4}$$

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 Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston on détermine

E_{sv} : 80.07% (Équivalent de sable visuel) ;

$E_{sv\ Esp}$: 82.72% (Équivalent de sable au piston) ;

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

Si $70 \leq E_s \leq 80$ le sable est propre et à faible pourcentage de fines argileuses convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.

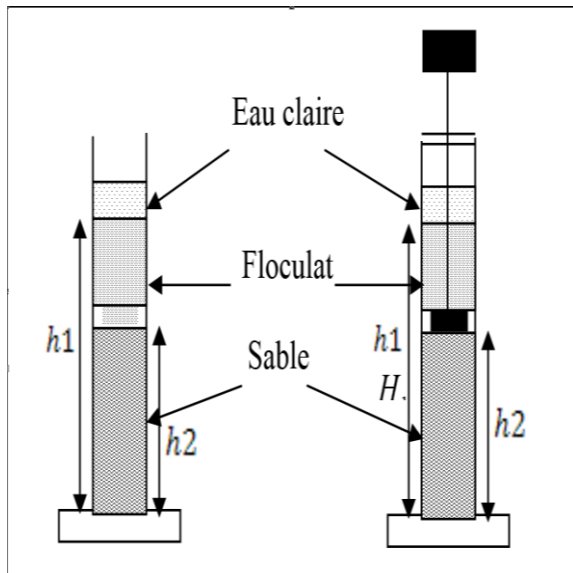


Figure 3.2. Equivalent de sable à vue et au piston [50].



Figure 3.4. Essai de l'équivalent de sable.

3.2.1.5 Le coefficient d'absorption (capacité d'absorption d'eau du sable)

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 pour déterminer le coefficient d'absorption du sable, A_b est déterminé par la formule suivante :

$$A_b = \frac{M_h - M_S}{M_S} * 100 \dots\dots\dots \text{Équation 0-5}$$

Pour notre cas le coefficient d'absorption d'eau $A_b = 0.76$



Figure 3.5. Teste de pré-séchage avec le cône et le piston.

Le tableau ci-après résume l'ensemble des caractéristiques physiques du sable d'alluvionnaire :

Tableau3-2. Caractéristique physique du sable.

<i>Caractéristique</i>	M_F (%)	ρ_{app}	ρ_s (kg/m^3)	A_b (%)	E_{s_v} (%)	E_{s_p} (%)
<i>Moyenne</i>	2.94	1.54	2.66	0.76	80.07	82.72

3.2.2 Ciment

Le ciment est 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 «CPA-CEM I/42.5»

Ain Elkbira (**ES** ciment résistance au sulfaté et **NA** les normes algériennes), c'est un ciment de référence, il contient au moins 95 % de clinker.



Figure3.3. Ciments utilisés dans la confection des mortiers autoplaçants.

3.2.2.1 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue : c'est le rapport de la masse de ciment (m_t) et son volume (v_s).

$$\gamma_{abs} = \frac{M_t}{V_s} \dots\dots\dots\text{Équation 0-6}$$

D'où on trouve : $\gamma_{abs} = 3.03 \text{ g/cm}^3$



Figure3.4. Essai de la masse volumique absolue du ciment.

✓ Surface spécifiqueSSB =3850 cm²/g (valeur donnée par le fabricant).

3.2.2 Analyse chimique du ciment

Tableau 3-3. L'analyse chimique du ciment utilisé.

<i>Element</i>	CaO	SiO₂	Al₂O₃	F₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	Perte Au feu
<i>Teneur (%)</i>	63,6	21,23	3,58	4,85	1,39	1,83	0,11	0,57	2,53

3.2.3 Additions

Les additions que nous avons utilisées dans notre recherche sont des éléments qui représentent des dimensions inférieurs à 80µm : La poudre de marbre, la fumée de silice.

3.2.3.1 Fumée de Silice

Les fumées de silice sont des poudres de silice extrêmement fines (inférieurs au 1µm). Ce sont des sous-produits de fabrication du silicium et de ses alliages. Suivant la composition des alliages, des produits secondaires ajoutés aux ingrédients principaux, la méthode de fabrication, etc., les propriétés des fumées de silice sont assez diverses.



Figure 3.8. Fumée de silice.

La fume de silice (CSF) utilisée est la fumée (CONDENSIL S95 DM) qui contient 92 % de silice pure ; sa densité réelle et de 2,24 ; sa densité apparente 0.40 à 0.45 et sa surface spécifique BET est de (20000 à 26000 cm²/g), sa composition chimique est présentée au tableau se dessus.

Tableau3-3. L'analyse chimique de la fumée de silice utilisée

Element	SiO ₂	Na ₂ O éq	SiC	C libre	S	Fe,AL,Mg,Ca	Cl
Teneur (%)	0,95% (≥92%)	0.60% (≤1.0%)	1.50% (≤3.0%)	1.50% (≤3.0%)	0.10% (≤0.20%)	1.00% (≤1.50%)	0.06% (≤0.20%)

3.2.3.2 Poudre de marbre (PM)

Comme déjà mentionne, la poudre de marbre faisant l’objet de cette étude est un déchet résultant de coupage, 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). Les propriétés physico-chimiques de la poudre de marbre sont données dans le Tableau :

Tableau 3-5. Propriétés physico-chimiques de la poudre de marbre.

Element	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅
Teneur (%)	0,42	56,01	0,12	0,13	0,06	0,01	0,01	0,01	0,43	0,03

La densité de la poudre de marbre est 2.86 et sa finesse est de 3600 cm²/g.



Figure3.5. La poudre de marbre.

3.2.4 Superplastifiant

L’adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d’eau fabriqué par la société Granitex et commercialisé sous le nom de MEDAFLOW30. Il est à base d’éther polycarboxylique modifié. Sa plage normale d’utilisation est fixée par la fiche technique 0.5% à 2% (en extrait sec) du poids de ciment. Il est sous forme liquide de couleur jaunâtre de 30% d’extrait sec. Sa densité est de 1.07.



Figure 3.10. Superplastifiant haut réduction d'eau.

3.2.5 Les fibres de polypropylènes

Les polypropylènes, sont des produits d'origine pétrolière, découverts en 1954, ce matériau de synthèse a connu une extension croissante dans l'industrie de textile où ils apportent les avantages suivants :

- Disponibilité à prix relativement faible ;
- Résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs ;
- Augmentation notable de la résistance aux chocs ;
- Limite l'ouverture des fissures.

Ces fibres sont fréquemment utilisées dans le bâtiment, en particulier dans réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façades, de tuyaux et pieux.



Figure. 3.11 Fibres de polypropylènes

3.2.6 Eau de gâchage

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

3.3 Formulation du mortier autoplaçant

Dans le BAP, la phase du mortier est une phase très importante car elle fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés requises pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant, une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques. En termes de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange. La fluidité élevée du mortier autoplaçant (MAP) peut être obtenue en ayant recours à des superplastifiants sans augmenter le rapport eau/ciment. L'ajout d'un superplastifiant peut provoquer une diminution significative du seuil de cisaillement mais n'aura qu'une influence limitée sur la viscosité plastique, tandis qu'une quantité supplémentaire d'eau peut diminuer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Selon Jin et Domone [14], des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominants.
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode et simple que tester un béton.

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, et comme mentionné précédemment, 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 Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ s}$.



Figure3.6. Composition de mortier autoplaçant.

3.3.1 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 [51] 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 0,40 afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270 mm surtout dans le cas de faibles dosages en superplastifiant. Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0,40.

3.3.2 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 de 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 0,5, 0,45 et 0,50 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/liant (Sp/L).

3.3.3 Variation du rapport Superplastifiant /Liant (Sp/L)

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en superplastifiant (polycarboxylates), sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement (cône d'Abrams) et du temps d'écoulement (V-funnel), en fonction du dosage en superplastifiant Sp/L variant de 1.2% à 2.2%.

3.3.4 Remplacement du ciment par les additions (Fumée de silice +Poudre de Marbre)

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 Sable/Mortier de 0.45 et un dosage en eau E/P de 0.40, 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. Il suffit de 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 de fumée de silice et poudre de marbre sur les propriétés des MAP à l'état frais. Pour cela, nous allons substituer le ciment du mélange de référence par le Fumée de Silice et la poudre de marbre en combinaison binaire ainsi par le fumée de silice poudre de marbre en combinaison ternaire à de composition sous cité dans le tableau (3-6).

Tableau 3-6. Différentes Combinaison des MAP binaire, ternaire.

Mélanges	N°	Nomination	Ajouts utilisé (%)
Mortier de Référence		M _{réf}	100% CPA
Mortiers aux ciments binaires	M1	M (10% PM)	10% PM+90% CPA
	M2	M (20% PM)	20% PM+80% CPA
	M3	M (30% PM)	30% PM+70% CPA
	M4	M (5% FS)	5% FS+95% CPA
	M5	M (10% FS)	10% FS+90% CPA
	M6	M (15% FS)	15% FS+85% CPA
Mortiers aux ciments Ternaires	M7	M (5FS+10 PM)	5% FS+10% PM+85% CPA
	M8	M (5FS+20 PM)	5% FS+20% PM+75% CPA
	M9	M (5FS+30 PM)	5% FS+10% PM+65% CPA
	M10	M (10FS+10 PM)	10% FS+10% PM+80% CPA
	M11	M (10FS+20 PM)	10% FS+20% PM+70% CPA
	M12	M (10FS+30 PM)	10% FS+30% PM+60% CPA
	M13	M (15FS+10 PM)	15% FS+10% PM+75% CPA
	M14	M (15FS+30 PM)	15% FS+20% PM+65% CPA
	M15	M (15FS+30 PM)	15% FS+30% PM+55% CPA

3.4 Matériels utilisés

3.4.1 Malaxeur

Les propriétés rhéologiques varient énormément selon le mode de malaxage et le dosage des constituants employés. Avant tout travail, le mode de malaxage doit être désigné selon les moyens disponibles et la quantité de mortiers à préparer. Le malaxeur représenté sur la figure 3.13 est parmi les appareils utilisés à l'université de Laghouat pour la confection des mortiers autoplaçant.



Figure 3.13. Malaxeur de mortier

3.4.2 Mini Cône

Un mini cône est employé pour évaluer l'ouvrabilité des mortiers à la fin du malaxage. Ce cône, présenté sur la figure 3.4, possède une hauteur de 150 mm avec un diamètre de la base de 100 mm et un diamètre supérieur de 70 mm

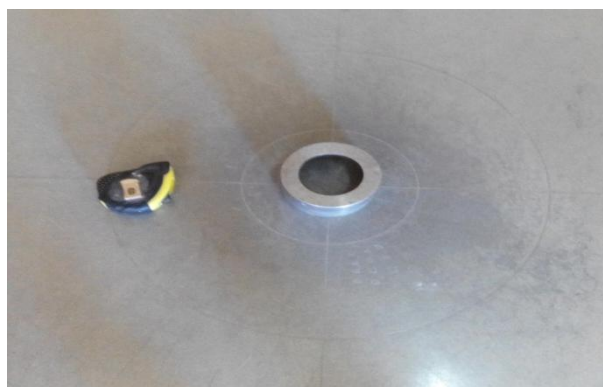


Figure 3.14. Mini cône.

3.4.3 Rhéomètre à mortier.

Pour déterminer, expérimentalement, le comportement rhéologique des mortiers, on a utilisé un rhéomètre rotatif ; Heidolph- RZR 2102 Control Z. Ce rhéomètre présenté sur la figure (3.15) est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation (Figure a), un croisillon 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.



Figure 3.15. Dispositif du rhéomètre utilisé.



a) *Agitateur*



b) *Croisillon*



c) *Récipient*

3.4.4 Autres accessoires

Une balance électronique, avec une précision de 0.1g, a été utilisée pour mesurer les ingrédients et la préparation des différents mortiers (figure3.16). De même, un thermomètre avec une précision de 0.1



Figure 3.16. Balance

3.5 Préparation des mortiers

La procédure de malaxage et le mode d'introduction de l'adjuvant utilisé pour fabriquer les mortiers sont illustrés dans le tableau (3-7) Chaque type de mortier a été confectionné en suivant les étapes ci-dessous :

- Introduire en premier le ciment, le sable et l'addition dans la cuve du malaxeur et mélanger à sec pendant 30sec à vitesse lente.
- Ajouter les 2/3 de l'eau de gâchage et malaxer pendant 1 min à vitesse lente.
- Introduire le 1/3 de l'eau de gâchage plus la quantité du superplastifiant progressivement en malaxant pendant 1 minute.
- Malaxer pendant 3minute à vitesse rapide.
- Préparer le mortier à l'essai d'étalement et de rhéologie.

Tableau 3-7. Procédure de malaxage et mode d'introduction de l'adjuvant.

Opérations	Introduire (Ciment, sable et Addition)	Verser (2/3 E)	Verser (1/3E+SP)	Préparation de l'essai
Durée	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> 0 30sec 1min 2min 3min 4min 5min → </div>			
Malaxeur	<i>Vitesse lente</i>			<i>Vitesse Rapide</i>

3.6 Essais expérimental

3.6.1 Essai d'étalement de MAP

L'essai consiste à remplir un mini--cône en MAP, 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 d1 et d2 Figure (3.17). L'étalement final est la moyenne des deux valeurs obtenues. Un contrôle visuel de la galette du mortier peut s'avérer intéressant.



Figure 3.17. Exécution et mesure d'étalement en mini-cône

3.6.2 Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel)

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), 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 3.18. Exécution et mesure d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel)

3.6.3 Essai au rhéomètre de MAP

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. L'utilisation d'une pale a été préférée à celle d'un cylindre où son insertion dans l'échantillon crée une perturbation minimale par rapport à l'insertion d'un cylindre, ce qui est un avantage pour les matériaux thixotropes comme le mortier.

3.6.3.1 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 [52]. Le profil utilisé doit avoir suffisamment de 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). La figure (3.19) illustre le profil choisi pour le déroulement des essais.

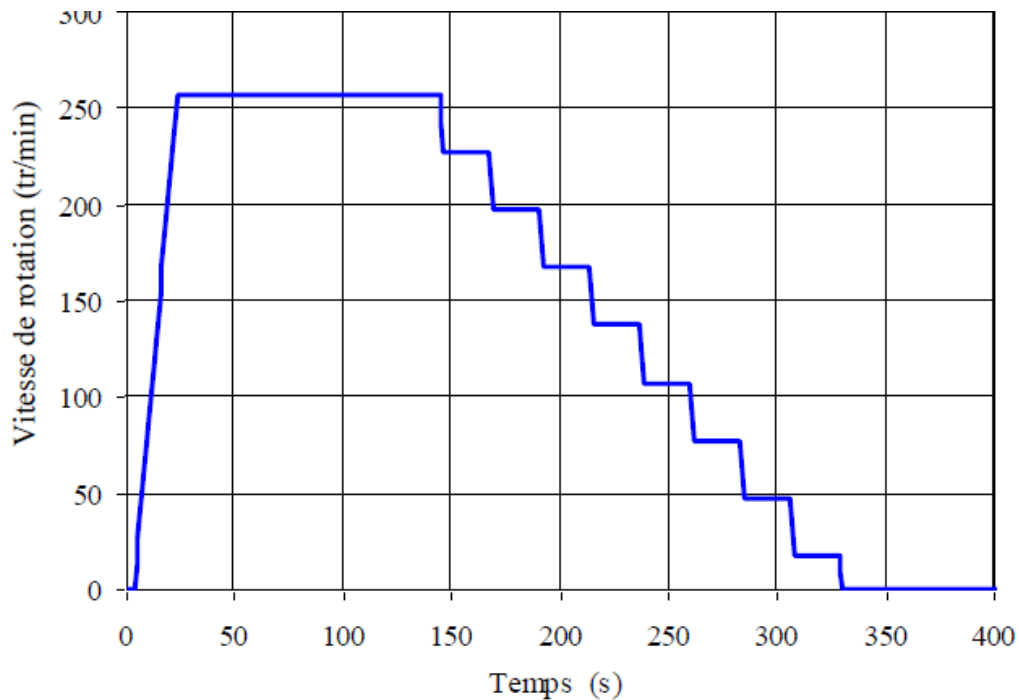


Figure 3.7. Profil de vitesse [52].

3.6.3.2 Déroulement de l’essai

Afin d’étudier le comportement 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 un 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 MAP (Figure 3.20).

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.

4^{ème} 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

$$M = M_{total} - M_{vide} \dots \dots \dots \text{Équation 0-7}$$

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



Figure 3.20. Positionnement de la pale de rhéomètre

3.6.3.3 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. En assimilant le comportement du MAP à un fluide binghamien, les paramètres rhéologiques τ_0 et μ peuvent être calculés en utilisant les quations de Lanos. Néanmoins, deux cas sont envisageables : le cisaillement peut être total ou partiel.

$$\dot{\gamma} = 2M \frac{d\Omega}{dM} \dots\dots\dots \text{Équation3-8}$$

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{M \frac{d\Omega}{dM}}{\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right)} - \frac{\Omega - M \cdot \frac{d\Omega}{dM}}{\ln\left(\frac{R_b}{R_c}\right)} \dots\dots\dots \text{Équation3-9}$$

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 engendré par une vitesse de rotation Ω_i peut donc être calculé par l'équation (10) ci-dessous :

$$\dot{\gamma}_i = \max(\dot{\gamma}_{j[10]}; \dot{\gamma}_{j[11]}) \dots\dots\dots \text{Équation3-10}$$

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 correspondante à la vitesse de rotation Ω_i s'obtient via l'équation (3-11) ci-dessous :

$$\tau_i = \frac{1}{2}(\tau_{j-1} + \tau_{j+1}) \quad \text{avec} \quad \tau_j(M) = \frac{M_j}{2\pi h R_b^2} \quad \text{.....Équation 0-11}$$

Les équations (10) et (11) permettent de passer du couple ($M_i - \Omega_i$) au couple ($\tau_i - \dot{\gamma}_i$) et de déterminer les paramètres rhéologiques du béton testé.

3.6.3.4 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 et à l'état durci, Les éprouvettes sont démoulées après 24h de coulage, ensuite elles sont conservées dans l'eau sature de chaux à une température de $20 \pm 5^\circ\text{C}$, jusqu'à à l'âge de l'essai.

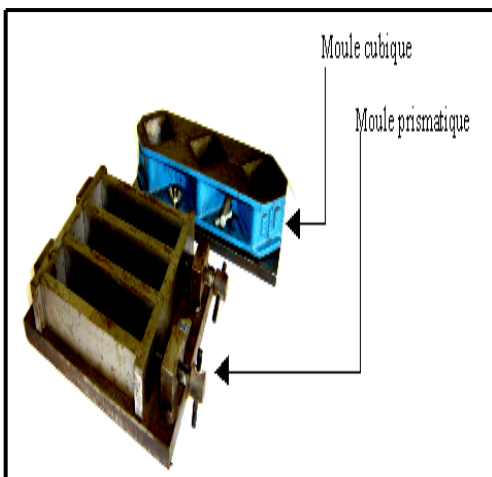


Figure3.21. Moules pour moulage des éprouvettes de mortier



Figure 3.22. Conservations d'éprouvettes

- Après 28 jours de conservation, on détermine les propriétés physiques et mécaniques des mortiers étudiés.
- Pour l'essai de retrait il faut protégée les éprouvettes après le coulage directement par un film plastique.

- Après démoulage les éprouvettes ont été conservées à l'air libre à la température ambiante du laboratoire (20±5) C°.

3.6.3.5 Résistance à la compression « Rc »

Conformément à la norme NFP 18-406 [53] ; 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 :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S} \dots\dots\dots\text{Équation 0-12}$$

- 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 mm^2 , qui égale 1600 mm^2

Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à $\pm 0.5 \text{ mm}$ 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).

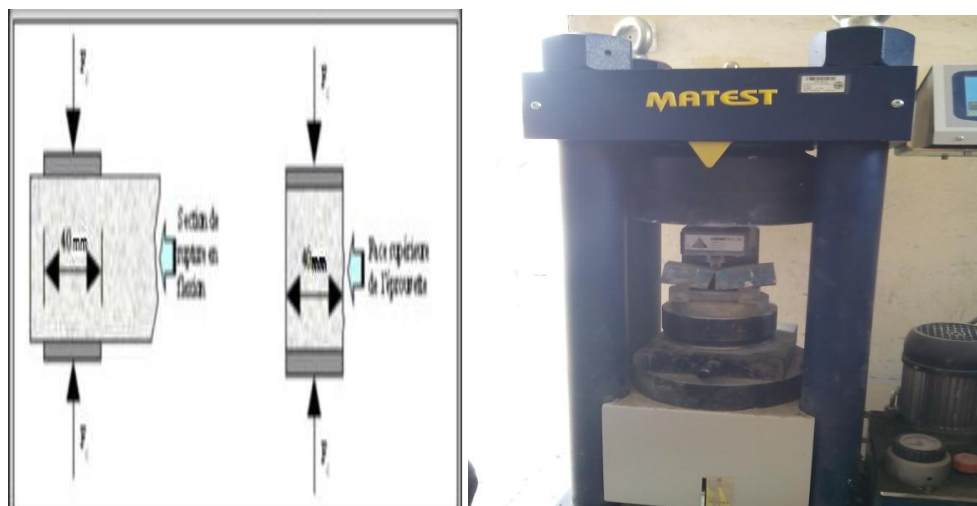


Figure3.8. Dispositif pour l'essai de résistance à la compression.

3.6.3.6 Evolution du retrait en fonction de l'âge

Au cours du temps, le volume des éprouvettes est diminué, cette diminution est due principalement à la perte de l'eau. Ce phénomène est appelé retrait de séchage, qui dépend des conditions de conservation (humidité, température), et des constituants du mortier.

On mesure la valeur du retrait avec un rétractomètre muni d'un comparateur digital. Les mesures de retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm³ selon la norme NFP 15-432 [54].

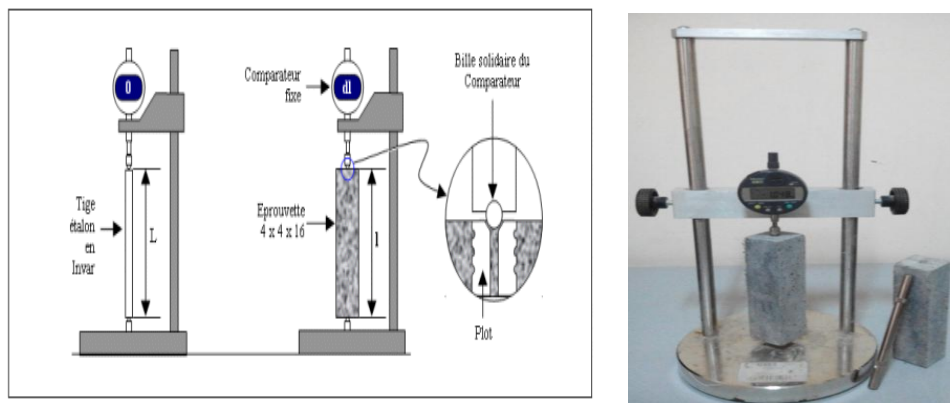


Figure 3.24. Dispositif pour l'essai de retrait

3.6.3.7 Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est réalisé conformément à la norme NFP 10-502 [55]. Cet essai est effectué sur des éprouvettes de dimensions (4×4×16) cm³ séchées jusqu'à poids constant. On pose les éprouvettes sur leurs bases (4×4) cm², en les séparant d'au moins 1 cm du fond du récipient et on maintient le niveau d'eau constant. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau à une profondeur de 5mm. Les surfaces latérales des éprouvettes sont imperméabilisées à l'aide de deux couches de verni pour avoir un écoulement uni directionnel. La base inférieure et la base supérieure ne sont pas imperméabilisées pour permettre la montée de l'eau par capillarité et l'évacuation de l'air pendant l'essai. Les éprouvettes sont pesées à des intervalles de temps réguliers

Le coefficient d'absorption d'eau par capillaire est calculée par la formule suivante :

$$C_c = \frac{100 \times M}{S\sqrt{t}} \quad \dots\dots\dots\text{Équation 0-13}$$

Cc : coefficient de capillarité qui représente la pente de droite ;

M : masse d'eau absorbée en gramme (g) ;

S : section de la base de l'éprouvette en mm² ;

t : temps d'absorption en (minutes).

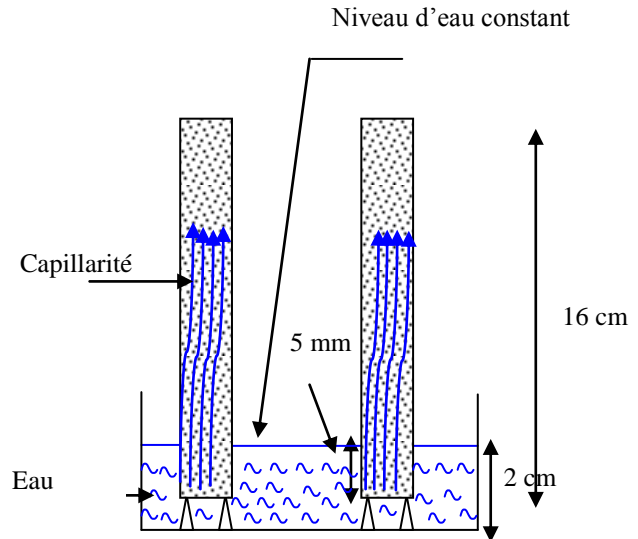


Figure3.9. Essai d'absorption d'eau par capillarité

3.7 Conclusion

Cette étude a été entreprise afin de caractériser les mortiers autoplaçant confectionnés à Base de différent dosage en fumée de silice et en fillers de poudre de marbre pour déterminer Le comportement rhéologique et mécanique du mortier autoplaçant est testé en variant taux de substitution de l'addition minérale.

Chapitre 4. Analyses des résultats et interprétations

4.1 Introduction

Dans le présent chapitre on présente les différents résultats expérimentaux relatifs aux différents essais effectués sur les mortiers autoplaçant binaire et ternaire.

Après une caractérisation physico-mécanique des différents constituants de base utilisée pour la formulation des mortiers autoplaçant au chapitre précédent, ce chapitre consiste à caractériser le mortier témoin (Mortier de référence) constitué principalement du sable, de ciment, d'eau et un superplastifiant. En deuxième étape il parvient notre collaboration essentielle et cela par l'étude des mortiers binaires et ternaires dans ce cas-là on s'intéresse beaucoup sur l'influence des ajouts minéraux tels que la fumée de silice et la poudre de marbre dans l'objectif d'élaborer des mortiers autoplaçant destiné à la réparation dont l'étude présente les propriétés rhéologiques à l'états frais et les propriétés mécaniques à jeune âge et à long terme.

4.2 Etude rhéologique de mortier autoplaçant de référence

La sélection du rapport Sable/Mortier et du rapport SP/L est ajustée par les essais préliminaires d'une part tels que l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être dans la plage de $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-Funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ secs}$. Et d'autre part ce qui rend cette étude moins ardue est la disponibilité d'un rhéomètre par lequel les propriétés rhéologique se caractérisé généralement par un faible seuil de cisailent et une viscosité suffisante on suivant cette méthode le mortier autoplaçant de référence a été confectionné et les résultats sont récapitulés dans le Tableau (4-1) cité ci-dessous.

Le mortier de référence comme indiquer sur le tableau ci-dessous présente un seuil de cisaillement de 8.25 (Pa.s) et viscosité de 2.26 (Pa.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 fumée de silice et la poudre marbre), ainsi que l'effet superplastifiant sur les paramètres rhéologiques, en comparant les valeurs trouvées au ceux de mortier de référence (M réf).

Tableau 4-1. Tableau récapitulatif des résultats de mortier autoplaçant.

Constituants du mélange pour le mortier de référence				
Ciment (kg)	Sable (kg)	Eau (kg)	SP (%)	SP (g)
753,66	1197,00	306.14	0.8	6,02
Propriétés rhéologique de mortier autoplaçant de référence				
Étalement en (cm)	31.7	Mortier autoplaçant	270 mm ≤ d ≤ 330 mm	
Temps d'écoulement (sec)	3.15		2 s ≤ t ≤ 10 s	
Viscosité en (Pa.s)	2.26			
Seuil de cisaillement en (Pa)	8,25			
Remarque	Mortier homogène et stable			

4.3 Étude rhéologique de mortier autoplaçant à base des ciments binaires

4.3.1 Mortier à base des ciments binaire de la poudre de marbre

Afin de connaître l'influence de la poudre de marbre sur ouvrabilité du mortier autoplaçant à l'état frais nous avons étudié trois compositions (M1, M2 et M3) avec des taux de substitution de 10%, 20% et 30%.

Les résultats obtenus en comparaison avec le mortier de référence dans le tableau (4-2) est consigne le dosage revenu pour testes formulation ainsi que

Tableau 4-2. Composition et résultats des essais sur les mortiers autoplaçants binaires (poudre de marbre)

Substitution du ciment par la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) constant					
Mélange pour 1m ³		M _{réf}	M ₁	M ₂	M ₃
Poudre de marbre (%)		0	10%	20%	30%
Constituants du mélange	Ciment (kg)	753,663	676,081	600,018	522,989
	Poudre de marbre (kg)	0	75,120	150,005	224,138
	Sable en (kg)	1197,000			
	Eau (kg)	306.14	305.57	304.55	304.11
	SP (%)	0.8			
	SP (kg)	6,02	6,01	6,00	5,97
Étalement (cm)		31.7	29	31.5	32.5
Temps d'écoulement (sec)		3.15	3.70	2.80	2.86
Viscosité (Pa.s)		2.26	2,06	1,86	1,64
Seuil de cisaillement (Pa)		8.25	7,42	5,83	6,65
Remarque		Mortier homogène en présence d'un problème de ressuage par rapport mortier référence pour M ₃			

4.3.1.1 Mesure des paramètres rhéologiques

La figure (4.1) présente le rhéogramme de comportement rhéologique des mortiers à base des ciments binaire constitue principalement de la poudre de marbre. On constate que la loi de comportement suit un loi Binghamien sous forme : $\tau = \tau_0 + \dot{\gamma}\mu$.

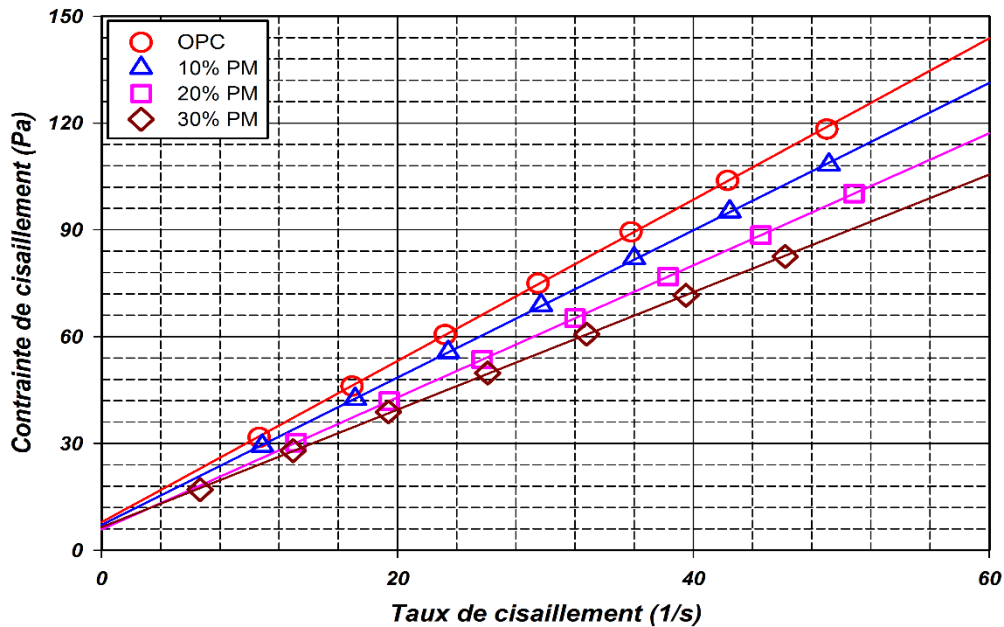


Figure 4.1. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier auto plaçant binaire (ciment + poudre de marbre).

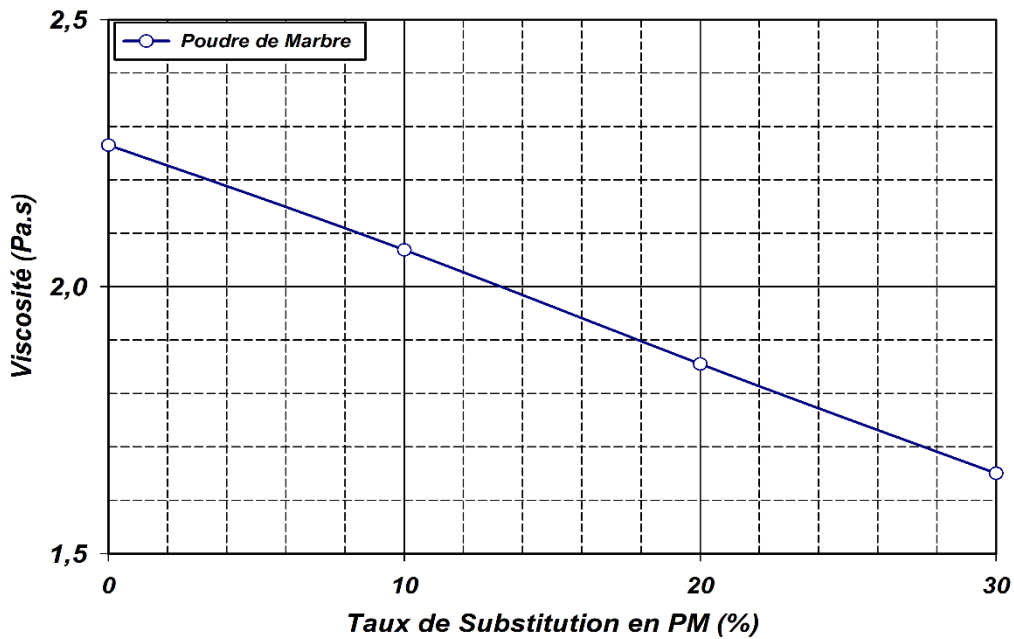


Figure 4.2. Influence de la poudre de marbre sur la viscosité des mortiers autoplaçant.

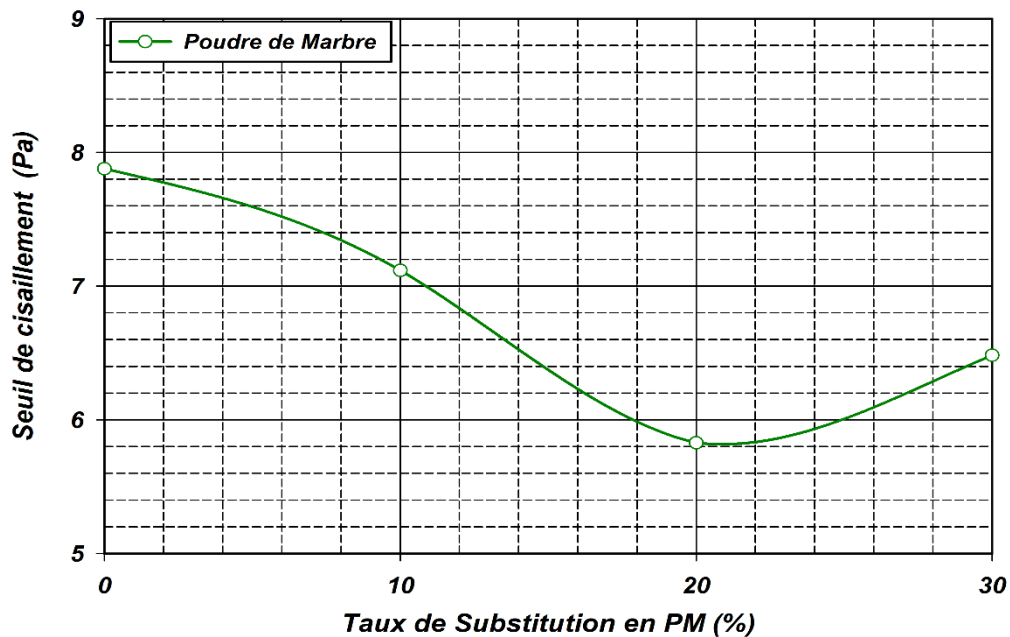


Figure 4.3. Effet taux de substitution par la poudre de marbre sur le seuil de cisaillement.

Les figures (4.2 et 4.3) présente l'effet de la substitution par la poudre de marbre sur la variation de la viscosité et la variation de 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 légère diminution de viscosité du mélange. Donc le mortier binaire (ciment + poudre de marbre) est très fluide on restant toujours dans la gamme autoplaçant.

Les résultats présentés sur la figure (4.2) montrent que substitution partielle du ciment par la poudre de marbre diminue la viscosité de mélange par rapport mélange référence à l'ordre de 2.06 à 1.64.

D'après la figure (4.3) on peut remarquer que seuil de cisaillement diminue avec l'augmentation de la concentration de la poudre de marbre atteignant une valeur de 6.65 à une concentration de 30% de cette dernière pour reprendre une légère augmentation.

On peut conclure d'après les résultats la poudre de marbre influe positivement sur les propriétés rhéologiques.

4.3.1.2 Etalement

Figure (4.4) montre la variation d'étalement du mortier en fonction de la teneur en poudre de marbre. Les résultats montrent que les meilleurs étalements sont obtenus pour les mortiers autoplaçant qui renferment une quantité de poudre de marbre élevés.

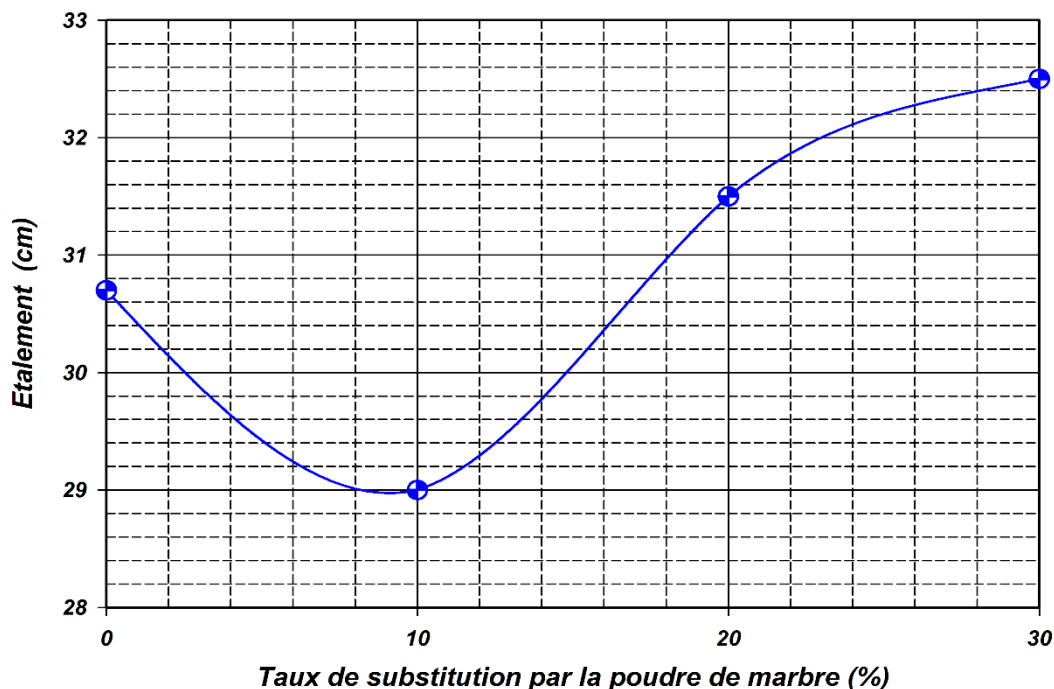


Figure 4.4. Effet de dosage de poudre de marbre sur l'étalement.

Selon les résultats on remarque que l'étalement varie dans l'intervalle de 290 mm à 325 mm lorsque le pourcentage poudre de marbre augmente de 10 à 30%, ces valeurs montrent l'effet bénéfique de la poudre de marbre sur le plan gain d'ouvrabilité. Ce qui se traduit par la croissance du diamètre d'étalement. Une meilleure déformabilité a été obtenue avec une teneur en PM de 30%. On observe dans mortier autoplaçants binaire l'influence du poudre de marbre a été bénéfique jusqu'à 20 et 30% au-delà un risque de ressuage.

Selon Dada et El Amri [8] l'étalement varie entre 27 à 32 cm lorsque la teneur en poudre de marbre augmente de 10 à 30%, ces valeurs montrent l'effet bénéfique de la poudre de marbre. Ainsi que Ouai et Bedj [41], ont montré que l'influence de la poudre de marbre a été bénéfique jusqu'à 20% au-delà un risque de ressuage est probable.

4.3.1.3 Temps d'écoulement par le V-funnel

L'effet de dosage de poudre de marbre sur le temps d'écoulement des représenté par la figure (4.5). Les résultats obtenus montrent une diminution du temps d'écoulement diminue

par rapport au temps obtenu par le mortier de référence. La diminution du temps d'écoulement est due à l'augmentation de la fluidité du mortier autoplaçants.

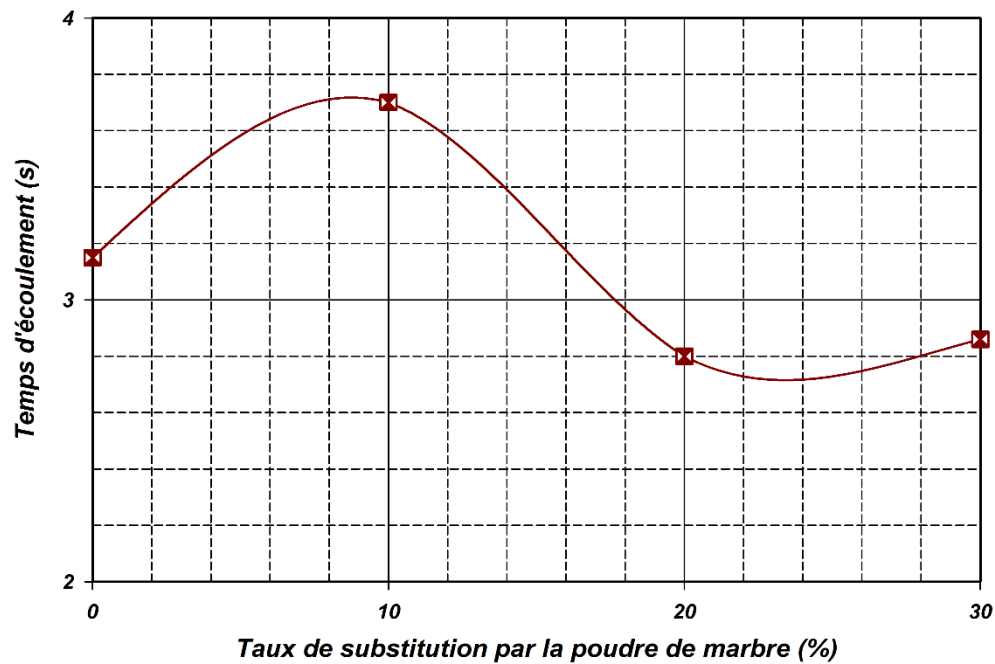


Figure 4.2. Effet de dosage de poudre de marbre sur le temps d'écoulement.

Selon Belaidi et al. [44] Le temps d'écoulement diminue avec l'augmentation de la 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.

4.3.2 Mortier à base des ciments binaire de la fumée de silice

Afin d'évaluer les modifications induites par la fumée de silice sur le besoin en adjuvant. Nous avons testé trois compositions des mortiers autoplaçant confectionnés à base de ciment binaire constitués de ciment et de la fumée de silice, avec un taux de substitution de ciment par fumée de silice variant entre 5 à 15%.

Notons que le dosage du superplastifiant et le rapport E/P, ainsi que le rapport sable /mortier sont maintenus constants pour l'ensemble des mortiers autoplaçant afin de pouvoir analyser les propriétés à l'état frais.

Tableau 4-3. Composition et résultats des essais des mortiers autoplaçant binaire (fumée de silice).

Substitution du ciment par la fumée de silice avec un dosage de SP (%) constant					
Mélange pour 1m ³		M _{réf}	M ₄	M ₅	M ₆
Fumée de silice (%)		0	5%	10%	15%
Constituants du mélange	Ciment (g)	753,66	711,98	669,98	629,02
	Fumée de silice (g)	0	37,47	74,44	111,00
	Sable en (g)	1197,00			
	Eau (g)	306.14	304.33	302.75	300.91
	SP (%)	0.8			
	SP (g)	6,02	5,99	5,95	5,92
Etalement (cm)		31.7	24.8	23.45	21.75
Temps d'écoulement (sec)		3.15	4.43	7.07	8.80
Viscosité (Pa.s)		2.26	3.02	3.53	3.85
Seuil de cisaillement (Pa)		8.25	10,56	10,67	12,08
Remarque		Mortier homogène	Perte ouvrabilité		

4.3.2.1 Mesure des paramètres rhéologiques

Sur le rhéogramme (4.6) on peut remarquer que l'évolution de contrainte de cisaillement varie linéairement en fonction de taux de cisaillement ce qui représenté bien le comportement Binghamien. On remarque que l'ajout de fumée de silice avec des dosages de 5% ,10% ,15% fait diminuer la fluidité des mélanges, est par conséquent la fumée de silice affect négativement le comportement rhéologique de mélange.

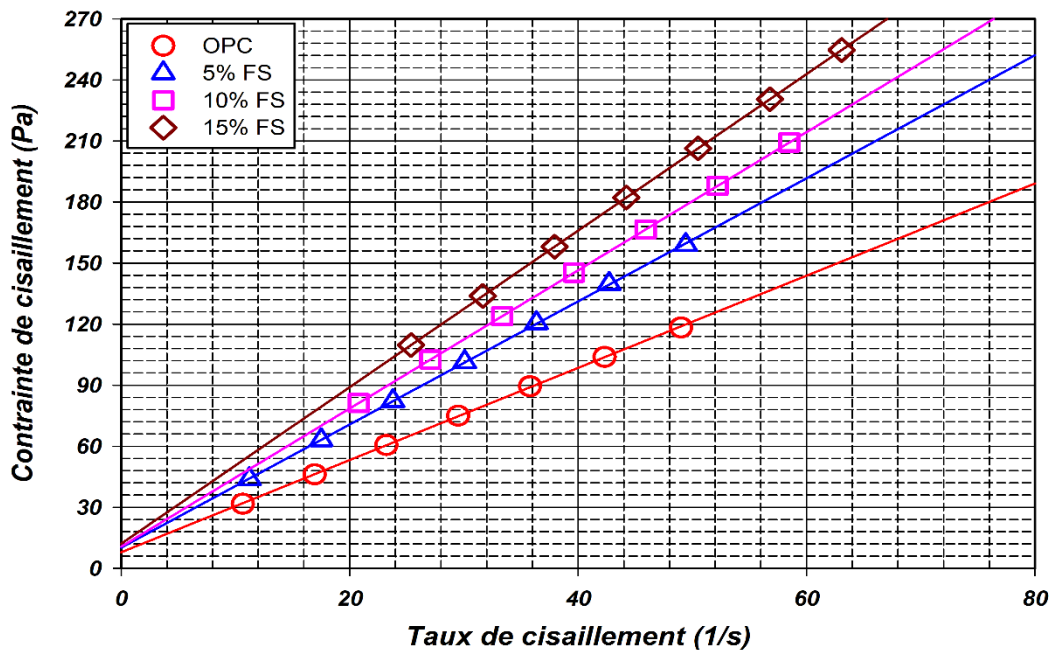


Figure 4.6. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier auto plaçant binaire (ciment + fumée de silice).

Les résultats obtenus des propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité) on constate l'augmentation de ces paramètres ce qui traduit par la perte de fluidité par rapport au mortier de référence et cela est due à l'absorption l'eau (forte demande en eau) et consommation superplastifiant par la fumée de silice.

La fumée de silice ajout minéraux très actif (activité pouzzolanique) caractérisées par des propriétés pouzzolaniques en réagissant en présence d'eau avec les constituants anhydres ou hydrates du ciment.

L'influence des particules fines de la fumée de silice sur la propriété rhéologique est due à la surface spécifique grande par ces fines, donc la diminution de la fluidité et augmentation de la viscosité suite à la finesse élevée.

Le Tableau (4.3) il est bien visible qu'une diminution de l'ouvrabilité est remarquée par l'introduction de la fumée de silice et une augmentation des propriétés rhéologiques.

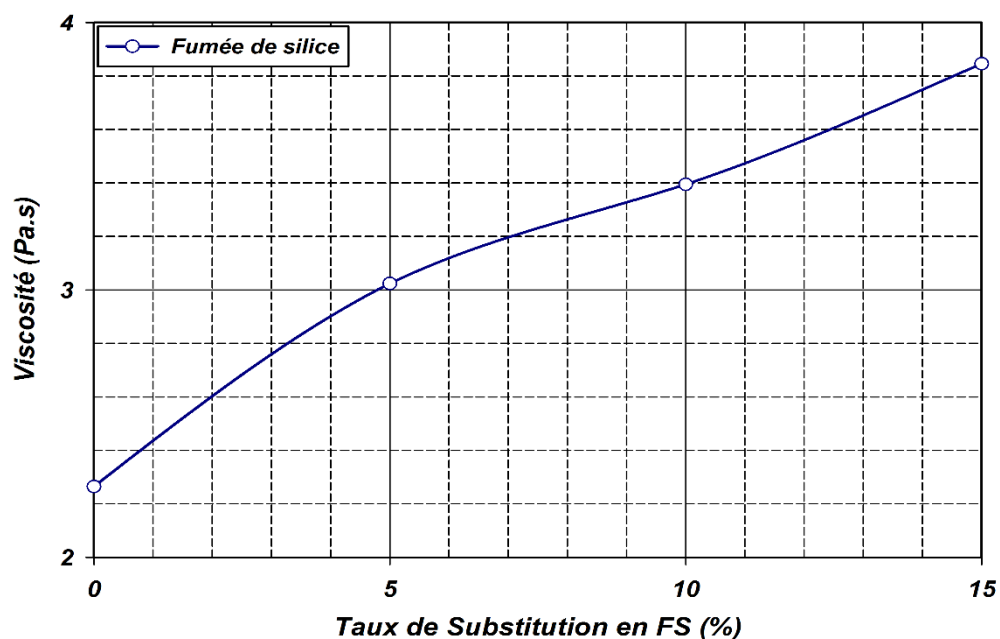


Figure 4.7. Influence de la fumée de silice sur la viscosité des mortiers autoplaçant.

D'après ces résultats présentés sur la figure (4.7) on remarque que la viscosité du mortier augmenté rapidement de 3.01 à 3.85 par rapport à celle de mortier référence la viscosité 2.26 (Pa.s). Par contre la poudre de marbre influe positivement sur les propriétés rhéologiques la fumée de silice effectue négativement sur comportement rhéologique. Dans ce sens-là on a essayé dans la suite de cette étude de mélanger les deux ajouts au même temps

pour bénéficier des propriétés de ces ajouts que ce soit à l'état frais ou durci (effet synergiques de ces ajouts).

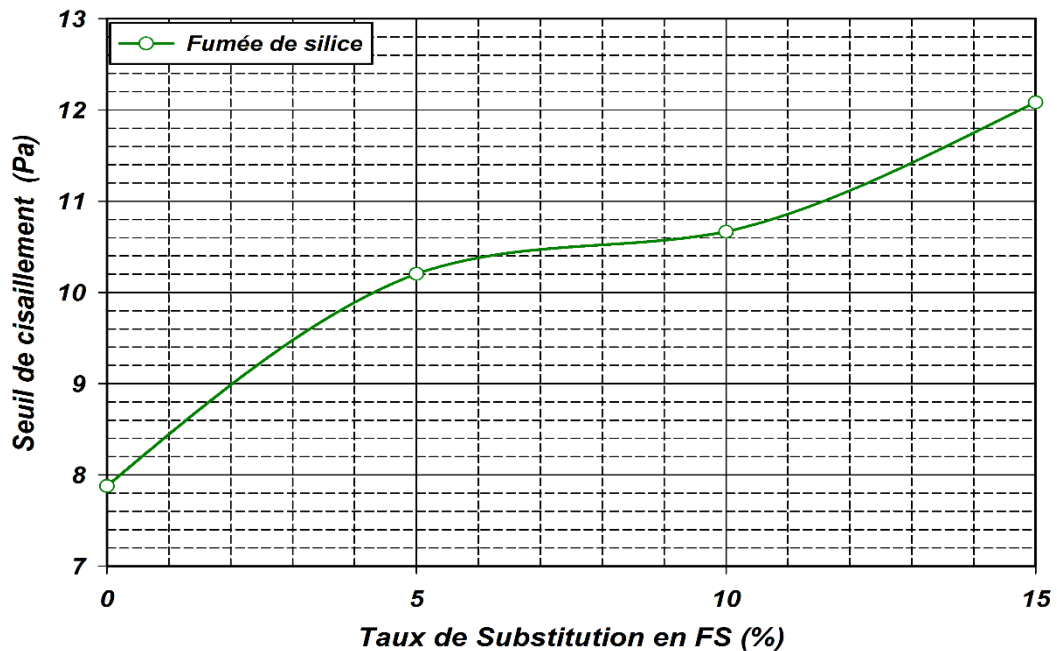


Figure 4.8. Effet taux de substitution par la fumée de silice sur le seuil de cisaillement.

À partir de la figure (4.8), on remarque que les valeurs du seuil de cisaillement de mortier augmenté avec l'augmentation du dosage en fumée de silice et avec un dosage superplastifiant constant. Le seuil de cisaillement (τ_0) mortier varie entre 10.56 et 12.08. Un comportement similaire à était observé sur l'effet de la fumée de silice sur la viscosité.

4.3.2.2 Etalement

La figure (4.9) montre l'effet de la fumée de silice sur l'étalement des mortiers. On remarque que l'ajout de fumée de silice avec des pourcentages croissants diminuer l'étalement de mortier.

Dans la figure (4.9) on remarque aussi que l'augmentation du taux de substitution du ciment par de la fumée de silice conduit à une diminution de la déformabilité du mortier .On note ici que toutes les valeurs de l'étalement par le mini cône sont dans l'intervalle 24.8 à 21.75, on remarque une augmentation de seuil de cisaillement a généré la réduction de l'étalement alors mortier base de fumée de silice non existant dans la gamme autoplaçant.

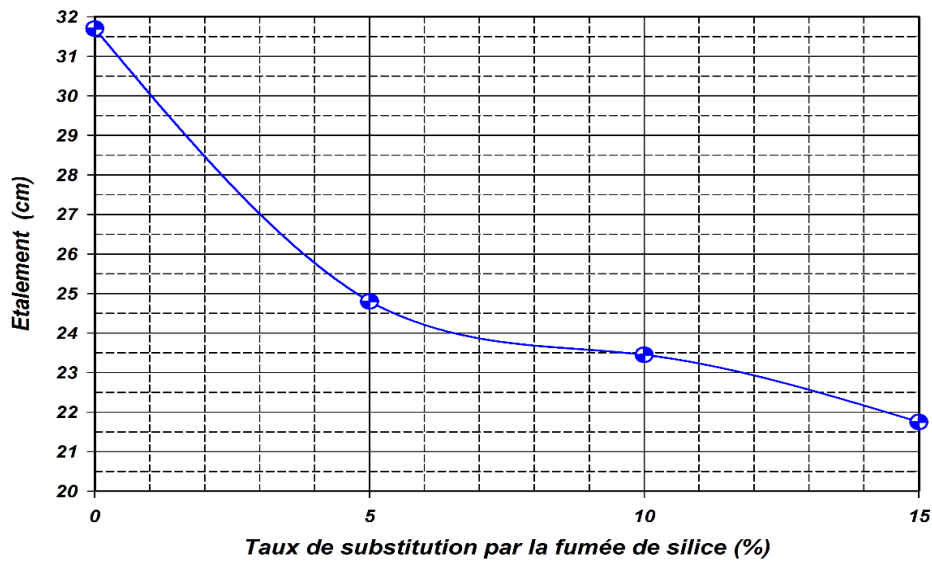


Figure 4.9. Effet de fumée de silice sur l'étalement des mortiers autoplaçant.

4.3.2.3 Temps d'écoulement par le V-funnel

Les résultats de la variation du temps d'écoulement en fonction de différents pourcentages de la fumée de silice sont regroupés dans le tableau (4-3) et présentés dans la figure (4.10). Ils montrent que le temps d'écoulement augmente en fonction du dosage en fumée de silice (5%, 10%, 15%).

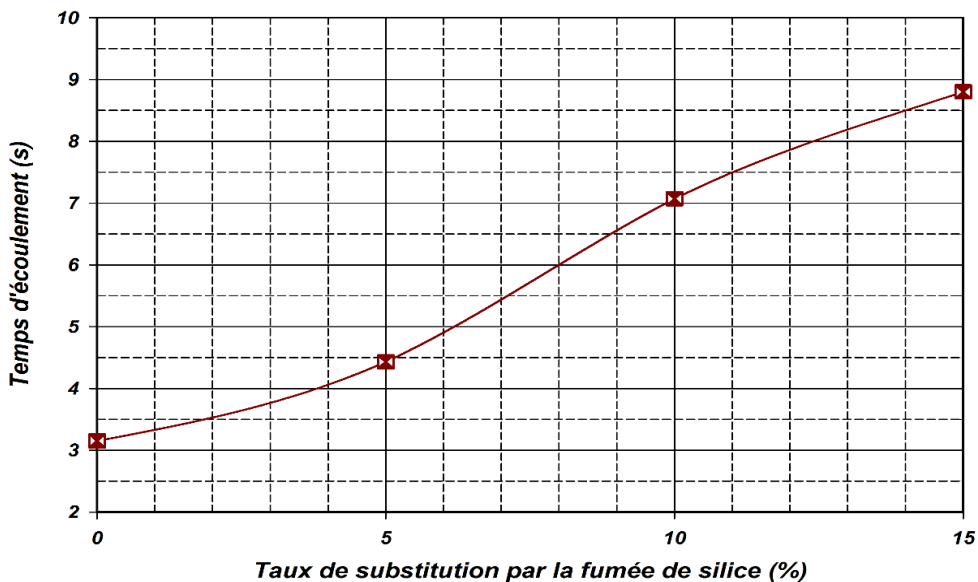


Figure 4.10. Variation de temps d'écoulement en fonction de la teneur en fumée de silice

Les ciments à base de la fumée de silice augmentent les propriétés rhéologiques le seuil de cisaillement et la viscosité, cela est traduit par une augmentation d'ouvrabilité c'est le résultat est dû principalement à l'augmentation de surface spécifique de liant par la fumée de

silice. Ainsi que d'absorption de l'eau et la consommation super plastifiant d'où la nécessité d'une correction au niveau du dosage en superplastifiant a été admis et la propriété d'absorption d'eau du fumée de silice nous avons utilisé des différents dosages en superplastifiant afin d'aboutir la fluidité

4.3.3 Effet de superplastifiant sur les paramètres rhéologiques

Pour améliorer la propriété des mortiers autoplacant confectionné avec de fumée de silice substitution partielle du ciment par des pourcentages varié de 5% à 15%. Nous avons effectués les mêmes essais pour déterminé les paramètres rhéologiques, le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité (μ) par le rhéomètre, l'étalement au mini cône et l'écoulement à entonnoir en V sur les mêmes compositions de mortier base a fumé de silice avec dosage de superplastifiant variable.

Tableau 4-4. Composition et résultats des essais d'ouvrabilité de mortier autoplacant binaire fumé de silice avec dosage de super plastifiant variable

<i>Substitution du ciment par la fumée de silice avec un dosage de SP (%)variable.</i>					
Mélange pour 1m ³		M _{réf}	M ₄	M ₅	M ₆
Fumée de silice (%)		0	5%	10%	15%
Constituants du mélange	Ciment (kg)	753,66	711,98	669,98	629,02
	Fumée de silice (kg)	0	37,47	74,44	111,00
	Sable en (kg)	1197,00			
	Eau (kg)	306.14	304.33	302.75	300.91
	SP (%)	0.8	1	1.2	1.2
	SP (kg)	6,02	7,49	8,93	8,88
Etalement (cm)		31.7	29,1	29,35	28,25
Temps d'écoulement (sec)		3.15	4,86	4.30	5.76
Viscosité (Pa.s)		2.26	3,67	3,48	2,89
Seuil de cisaillement (Pa)		8.25	13,05	12,69	11,22
Remarque		Mortier homogène et fluide			

4.3.3.1 Mesure des paramètres rhéologiques

Pour étudier l'influence de superplastifiant sur les propriétés de mortier autoplacants à base de la fumée de silice la figure (4.11) montre le rhéogramme de comportement rhéologique en fonction des dosages variables en superplastifiant.

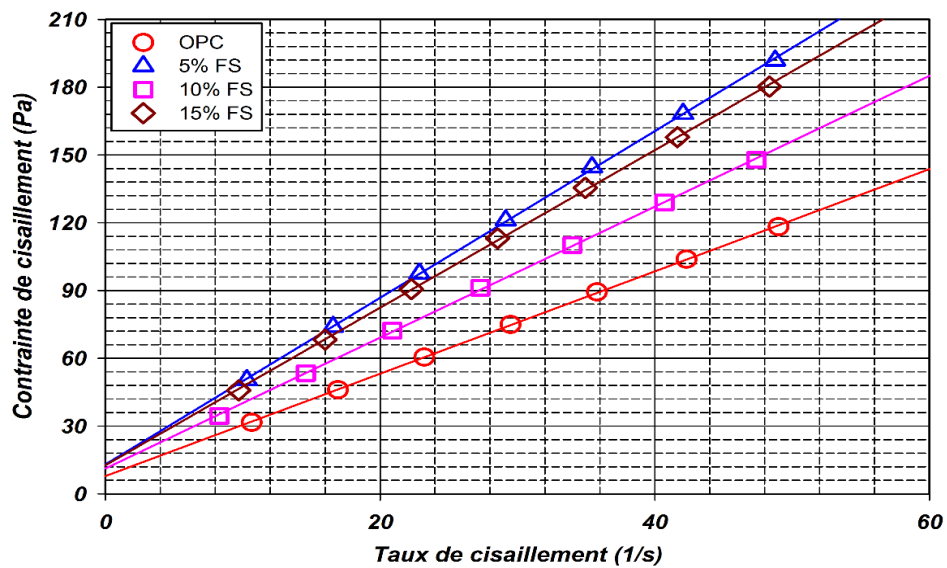


Figure 4.11. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier auto plaçant binaire (ciment + fumée de silice) avec SP variable.

Le caractère de base du mortier autoplaçants sont une fluidité élevé et une grande résistance à la ségrégation ces deux propriétés contradictoires s’expliquent par un seuil de cisaillement minimal et une viscosité appropriée.

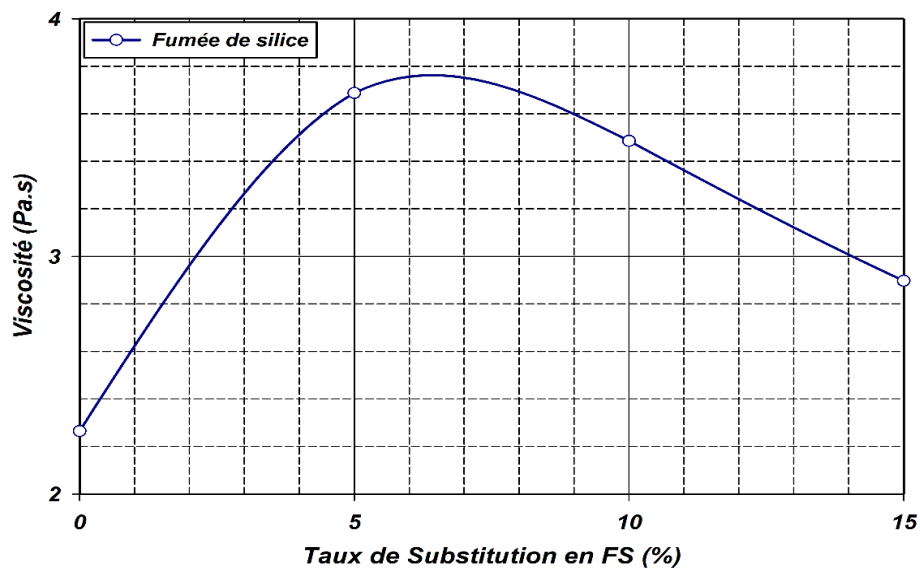


Figure 4.12. Effet d’ajustement du dosage en SP sur la viscosité μ .

D’après les figures (4.12, et 4.13) on constate que l’augmentation de la teneur en superplastifiant diminue la viscosité et le seuil de cisaillement. Cette augmentation conduit à une fluidité de mélange. Des dosages de superplastifiant variant entre 1% à 1.2% semblent être une solution pour changer les paramètres rhéologiques visible. Par ailleurs les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l’effet positif de l’ajustement du dosage en

superplastifiant. Les paramètres rhéologiques de mortier binaire (seuil de cisaillement et viscosité plastique) ont diminué avec l'augmentation la teneur en superplastifiant.

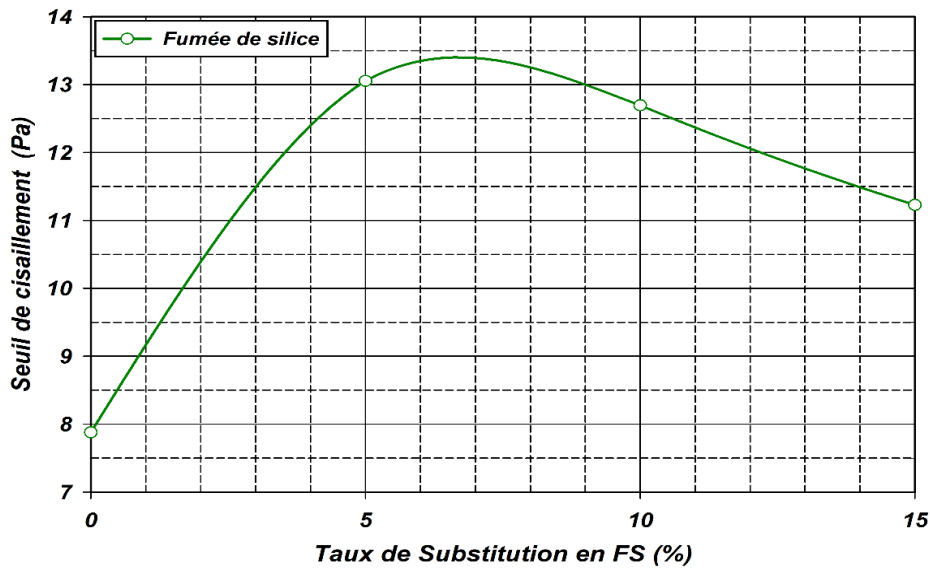


Figure 4.13. Effet d'ajustement du dosage en SP sur le seuil de cisaillement μ .

Les figures (4.14 et 4.15) présentent l'effet d'ajustement du dosage en superplastifiant en fonction d'étalement et le temps d'écoulement des mortiers confection à base ciment binaire (ciment + fumée de silice) avec différents taux de substitution de ciment par fumée de silice.

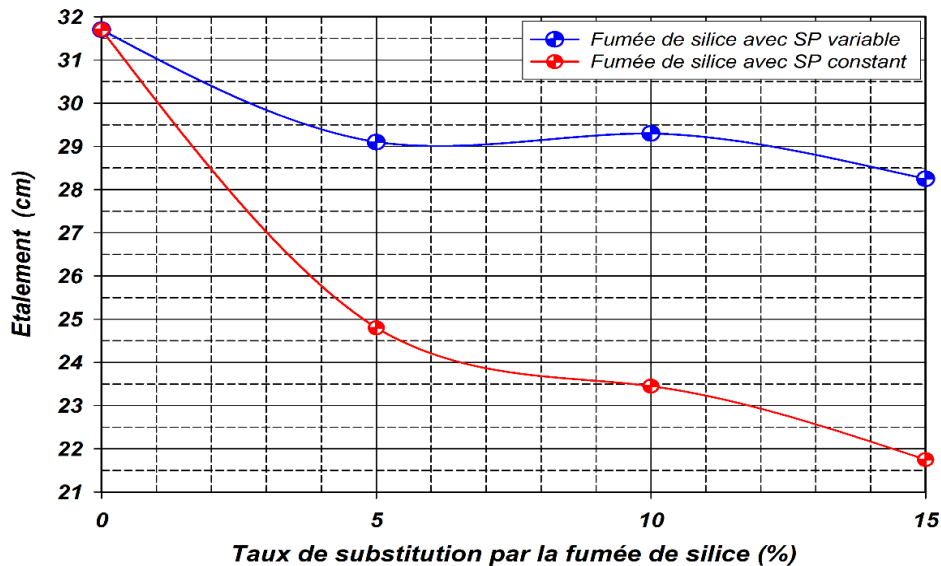


Figure 4.14. Effet de la correction du dosage en supreplastifiant sur l'étalement.

D'après les figures (4.14 et 4.15) on remarque l'augmentation de la teneur en supreplastifiant entraine une augmentation de diamètres d'étalement variant entre 28 à 29 cm

par rapport à ceux avec dosage de superplastifiant constant. Notons que cette augmentation a été provoquée par le dosage de superplastifiant variant 1% à 1.2%.

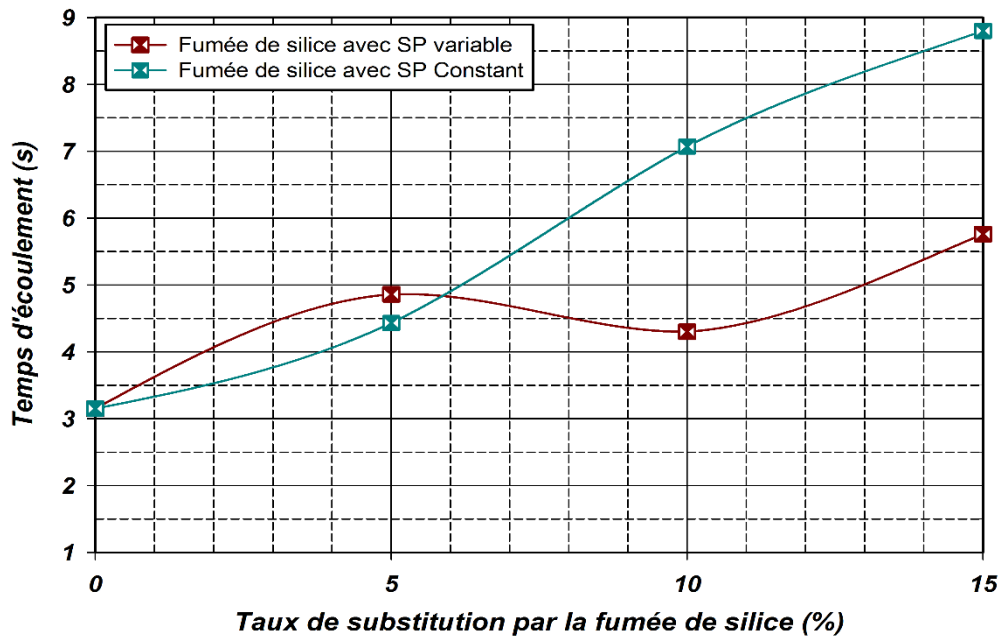


Figure 4.15. Effet de la correction du dosage en superplastifiant sur le temps d'écoulement des mortiers.

En par ailleurs, on peut noter aussi, dans figure une amélioration considérable de le temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V, et cela due principalement à l'augmentation de dosage en superplastifiant.

4.4 Étude rhéologique de mortier autoplaçant à base des ciments ternaires

Pour étudier l'effet combiné de fumée de silice et la poudre de marbre sur les caractéristiques des mortiers autoplaçant à l'état frais, les résultats des essais d'ouvrabilité de mortier autoplaçant à base des ciments ternaires sont rapportés dans les tableaux (4.5, 4.6, 4.7, 4.8 et 4.9). Notre choix à porte sur neuf mélanges des mortiers pour trois rapports différents.

Vu les résultats des mélanges binaires base sur la fumée de silice et la poudre de marbre. Nous avons constaté que la fumée de silice affecte négativement la rhéologie. Par contre la poudre de marbre apporte un effet positivement la rhéologie. La question qui se pose dans cette cas comment la réagie soit fumée de silice avec poudre de marbre ensemble.

4.4.1 Effet du couple 5% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre

Dans le tableau suivant, nous avons testé trois mélanges avec la fixation de pourcentage de la fumée de silice à 5% et on a varié la poudre de marbre de 10 %, 20% et 30%.

Tableau 4-5. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants ternaires avec 5% fumé de silice avec dosage de super plastifiant constant

Substitution du ciment par la fumée de silice et la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) constant					
Mélange pour 1m ³		M _{réf}	M ₇	M ₈	M ₉
Ciment (%)		100	85	75	65
Fumée de silice (%)		0	5	5	5
Poudre de Marbre (%)		0	10	20	30
Constituants du mélange	Ciment (kg)	753,66	634,57	559,01	483,24
	Fumée de silice (kg)	0	37,32	37,26	37,17
	Poudre de Marbre (kg)	0	74,65	149,07	223,03
	Sable en (kg)	1197,00			
	Eau (kg)	306.14	303.89	302.86	302.06
	SP (%)	0.8			
	SP (kg)	6,02	5,97	5,96	5,94
Etalement (cm)		31.7	27.2	28.35	30.2
Temps d'écoulement (sec)		3.15	4.06	3.98	3.70
Viscosité (Pa.s)		2.26	3.02	3.26	3,01
Seuil de cisaillement (Pa)		8.25	10.67	12.32	11,42
Remarque		Mortier fluide			

4.4.1.1 Mesure des paramètres rhéologiques

Le mortier autoplaçant se caractérise généralement par une fluidité élevée. L'évolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement des MAP en fonction de dosage de fumée de silice et de la poudre de marbre sont apparues dans la figure (4.16).

La figure (4.16) et tableau (4.5) montre que la fluidité augmentée avec l'augmentation de la teneur de poudre de marbre donc la viscosité du mortier ternaire à base de 5% FS +X% PM diminué mais par rapport le mélange de référence restent élevés. La viscosité de mortier 5% FS +X% PM varie entre 3.01 à 3.26 Pa.s

D'après les résultats présentés dans la figure ci-dessus, on constate que la fumée de silice influe négativement sur la viscosité des mélanges et seuil de cisaillement, malgré la présence de la poudre de marbre dans ces mélanges, on remarque aussi une amélioration par rapport au mortier binaire à base de 5% de fumée de silice amélioré la fluidité du mortier.

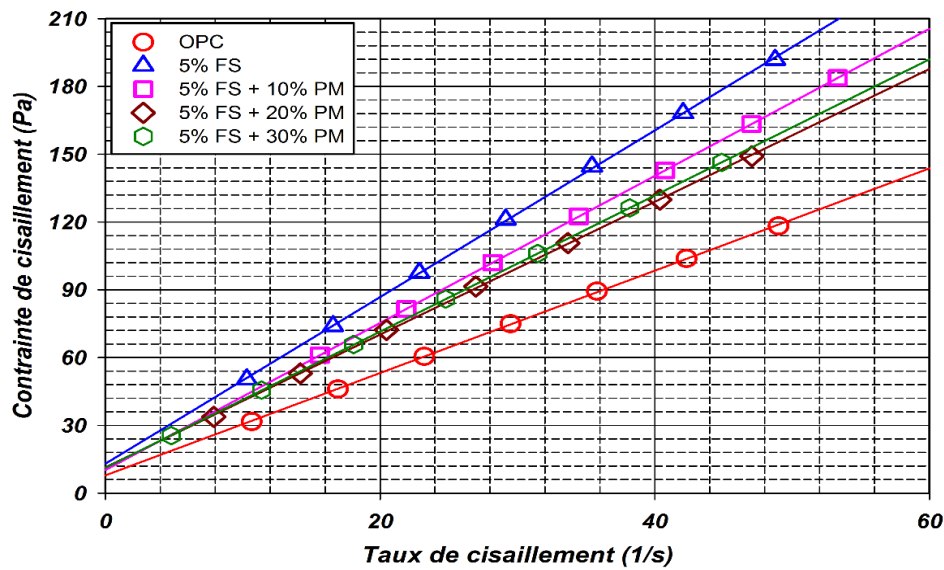


Figure 4.16. Évolution de la contraite de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier auto plaçant ternaire de 5%de la fumée de silice et de la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) constant.

Evolution de la viscosité et le seuil de cisaillement des MAP en fonction de dosage combiné de fumée de silice et e la poudre de marbre est présentée dans les figures (4.17 et 4.18). Ces figures montrent que l’ajout de poudre de marbre avec des pourcentages 10, 20 et 30% avec 5% de la fumée de silice 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 poudre de marbre jusqu’à 30%. Par contre mortier autoplaçant composé à 5% FS+30%PM diminue légèrement la viscosité par rapport mortier base à 5% FS+ 20% PM.

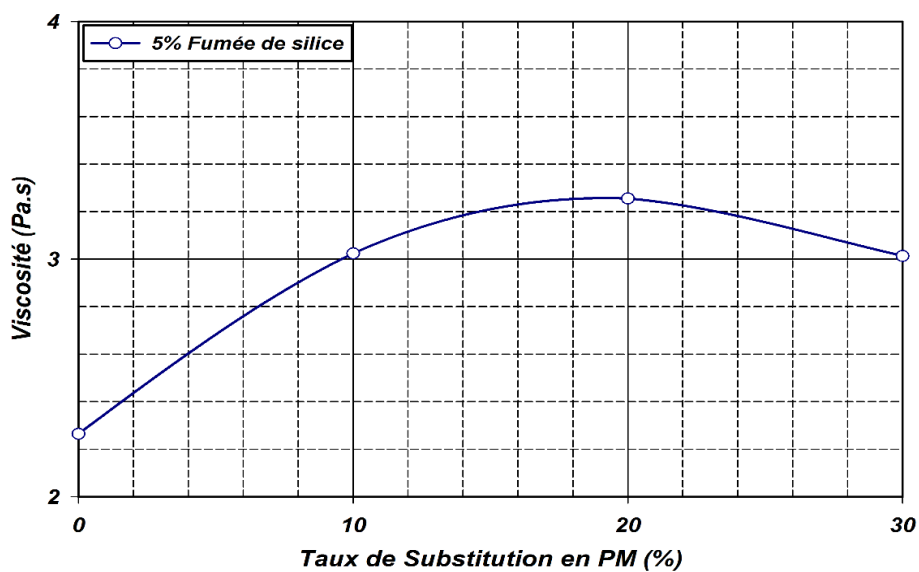


Figure 4.17. Évolution de la viscosité des mortiers ternaires base à 5% de la fumée de silice et de la poudre de marbre.

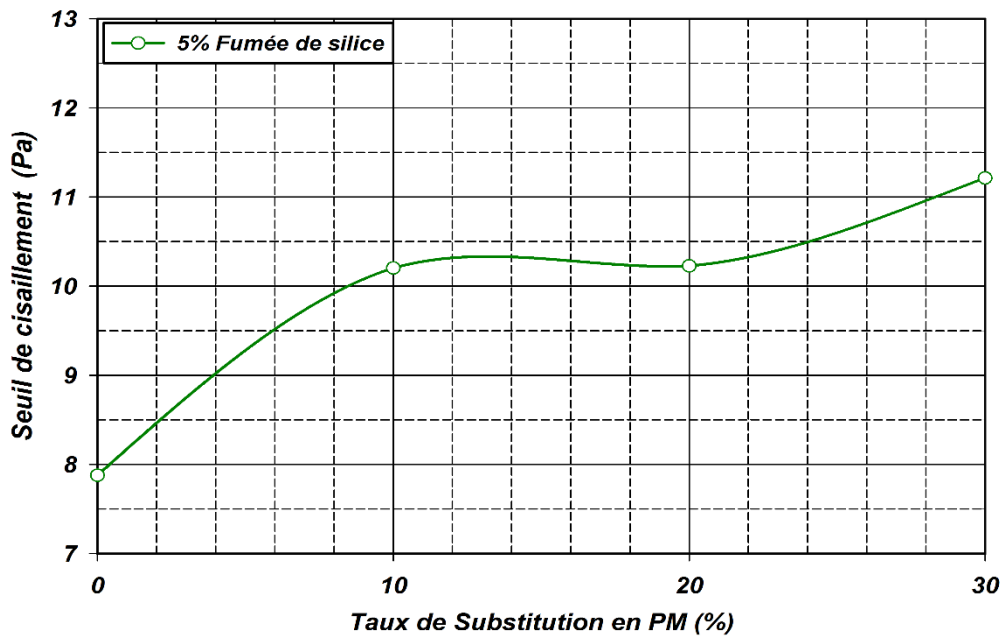


Figure 4.18. Evolution de seuil de cisaillement mortiers ternaires base à 5% de la fumée de silice et de la poudre de marbre.

Dans ce cas-là la combinaison de fumée de silice avec poudre de marbre affecté négativement sur comportement rhéologique en comparaison avec le mélange de référence.

4.4.1.2 Etalement

La figure (4.19) présent l'effet du mortier ternaire composé du (Ciment + 5% de fumée de silice + X% poudre de marbre) sur l'étalement des mortiers. Notons que le dosage superplastifiant est constant à 0.8%.

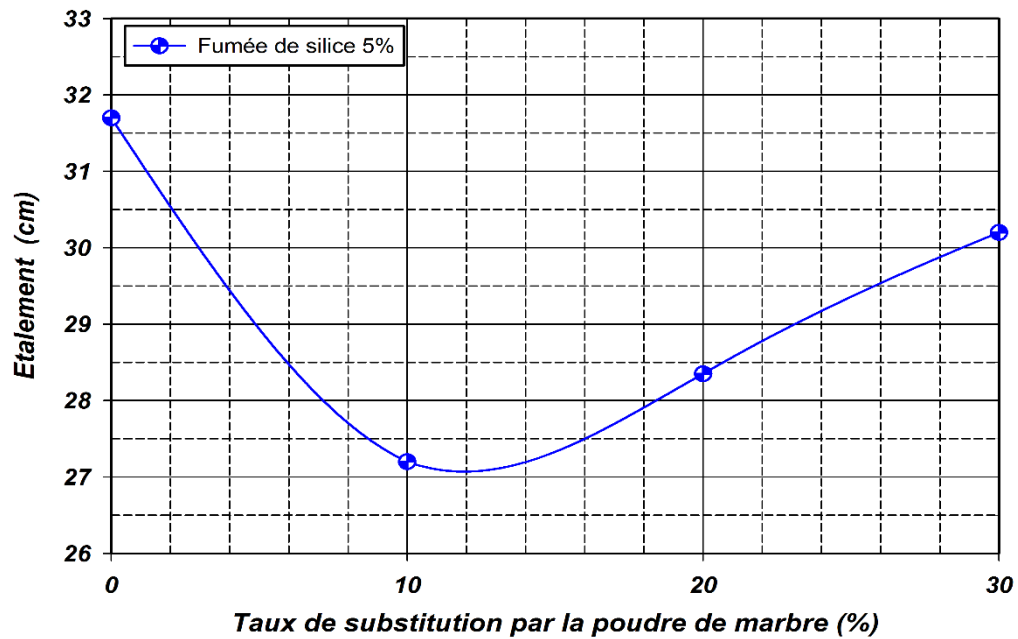


Figure 4.19. Effet de la combinaison de la fumée de silice et poudre de marbre sur l'étalement.

D'après la figure (4.19) on constate que le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation de la teneur en poudre de marbre. Les valeurs d'étalement comprises entre (27. 2 cm à 30.2 cm). On notera cependant que le mortier (5%FS +30%PM) présente la valeur maximale d'étalement égal 30.2cm.

4.4.1.3 Temps d'écoulement par le V-funnel

Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du pourcentage de fumée de silice (5%) et en poudre de marbre sont représentés dans la Figure (4.20).

La combinaison de fumée de silice à 5% et la poudre de marbre a augmenté le temps d'écoulement et par conséquent la de la fluidité des mélanges faible par rapport de mortier binaire. Le temps d'écoulement varie de 4.06 s à 3.70 s. 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 reste dans le domaine efficace ($T_e = 2$ à 10 s).

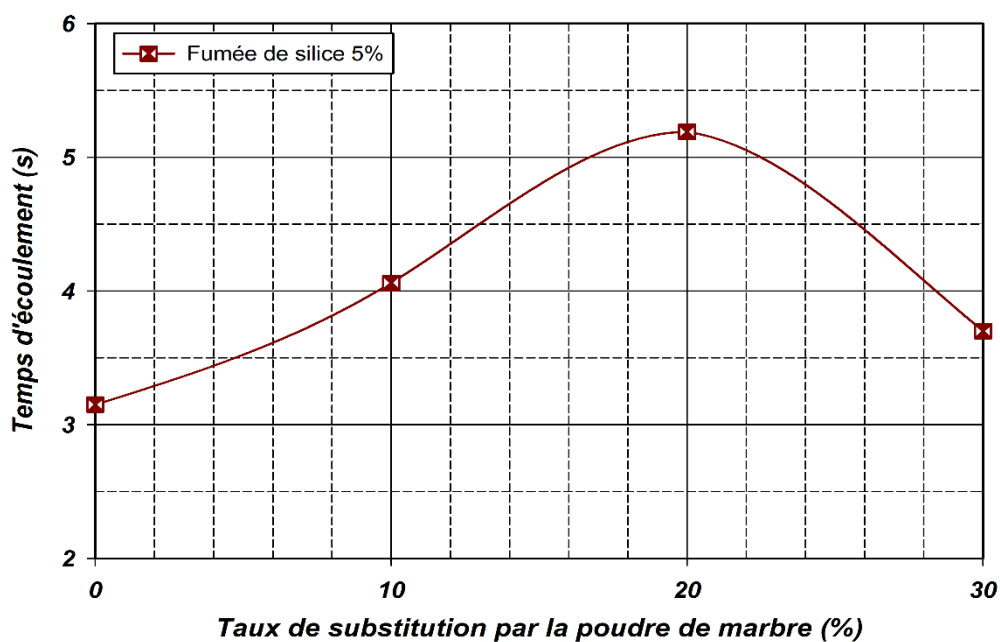


Figure 4.20. Effet de la combinaison de la fumée de silice et poudre de marbre sur temps d'écoulement.

La substitution du ciment par la fumée de silice (5%) et poudre a affecté positivement sur la fluidité des mortiers autoplaçant par rapport à celle du mortier binaire.

4.4.2 Effet du couple 10% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre

Afin d'étudier l'effet couple de fumée de silice et du poudre de marbre sur propriété des mortiers autoplaçant à l'état frais. Nous avons préparé trois compositions avec différent pourcentage de la poudre de marbre 10, 20, 30% toujours en maintien le pourcentage de la fumée de silice à 10%. Les compositions et les résultats sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 4-6. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants ternaires avec 10% fumé de silice avec dosage de super plastifiant constant

Substitution du ciment par la fumée de silice et la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) constant					
Mélange pour 1m ³		M _{réf}	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₂
Ciment (%)		100	80	70	60
Fumée de silice (%)		0	10	10	10
Poudre de Marbre (%)		0	10	20	30
Constituants du mélange	Ciment (kg)	753,66	593,74	518,18	443,00
	Fumée de silice (kg)	0	74,21	74,027	73,83
	Poudre de Marbre (kg)	0	74,21	148,05	221,50
	Sable en (kg)	1197,00			
	Eau (kg)	306.14	302.06	301.26	300.45
	SP (%)	0.8			
	SP (kg)	6,02	5,937	5,922	5,907
Etalement (cm)		31.7	25.35	24.85	28.1
Temps d'écoulement (sec)		3.15	4.45	6.10	4.7
Viscosité (Pa.s)		2.26	3,51	3,52	3,77
Seuil de cisaillement (Pa)		8.25	11,02	11,07	11,21
Remarque		Perte d'ouvrabilité			

4.4.2.1 Mesure des paramètres rhéologiques

Les résultats obtenus représenté graphiquement sur le rhéogramme (Figure 4.21) du mortier autoplaçant ternaire avec 10% de la fumée de silice et la poudre de marbre varient à 10%, 20% et 30%.

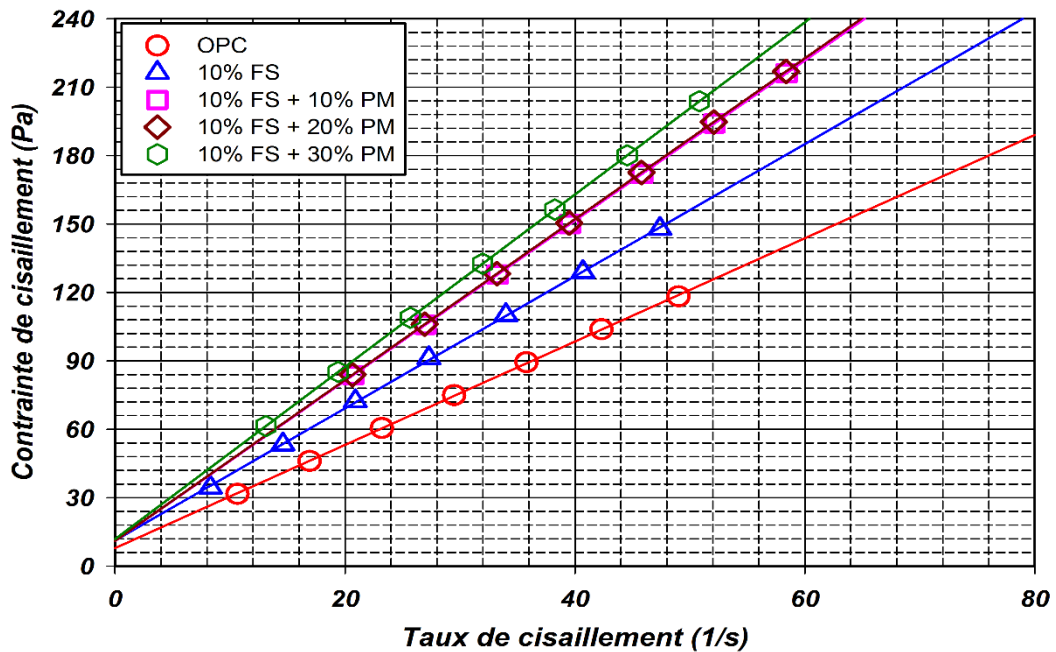


Figure 4.21. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement de mortier auto plaçant ternaire de 10% de la fumée de silice et de la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) constant.

Montrent que les paramètres rhéologiques augmenté par rapport mortier référence par l'augmentation de la viscosité ce qui s'explique graphiquement par la pente de la droit du rhéogramme et seuil de cisaillement est le point d'intersection avec l'axe YY'.

La viscosité mortier binaire (10% FS) égal 3.53 et la viscosité de mortier ternaire base sur 10% fumée de silice avec poudre de marbre varie entre 3.51et3.77 donc la poudre de marbre n'a pas influé par rapport à fumée de silice sur comportement rhéologiques. Aussi bien que perceptible à control visuel la fluidité du mortier diminuer.

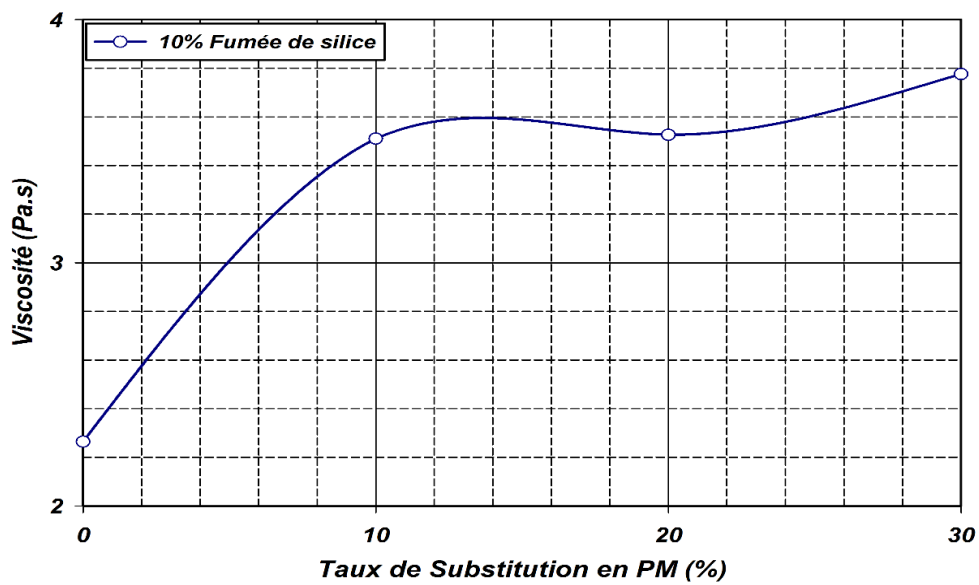


Figure 4-22. Variation de la viscosité du mortier ternaire avec 10% fumée de silice et X% poudre de marbre

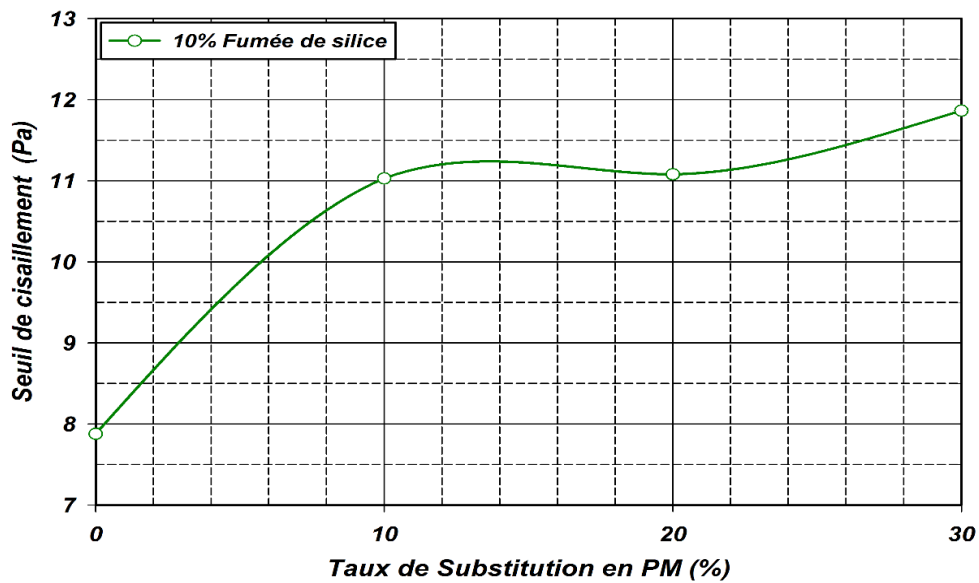


Figure4-23. Variation de seuil de cisaillement du mortier ternaire avec 10% fumée de silice et X% poudre de marbre.

Evolution de seuil de cisaillement et la viscosité des mortiers autoplaçant en fonction de dosage de couple (fumée de silice et poudre de marbre) sont présentés par la figure (4.22 et 4.23). Cette figure montre que l'ajout de fumée de silice avec un taux de 10% avec la poudre de marbre (10%, 20% et 30%). On remarque un comportement similaire à celle des mortiers avec 5%FS + X% PM, ce comportement ce traduit par une augmentation de la viscosité et le seuil de cisaillement par rapport à celle de référence. Mais au-delà de mortier de références la variation reste légèrement significative.

4.4.2.2 Etalement

L'étalement du mortier à base du mortier ternaire confectionné par un taux de substitution de 20% à 40% des ajouts est représenté dans la figure 4.2.

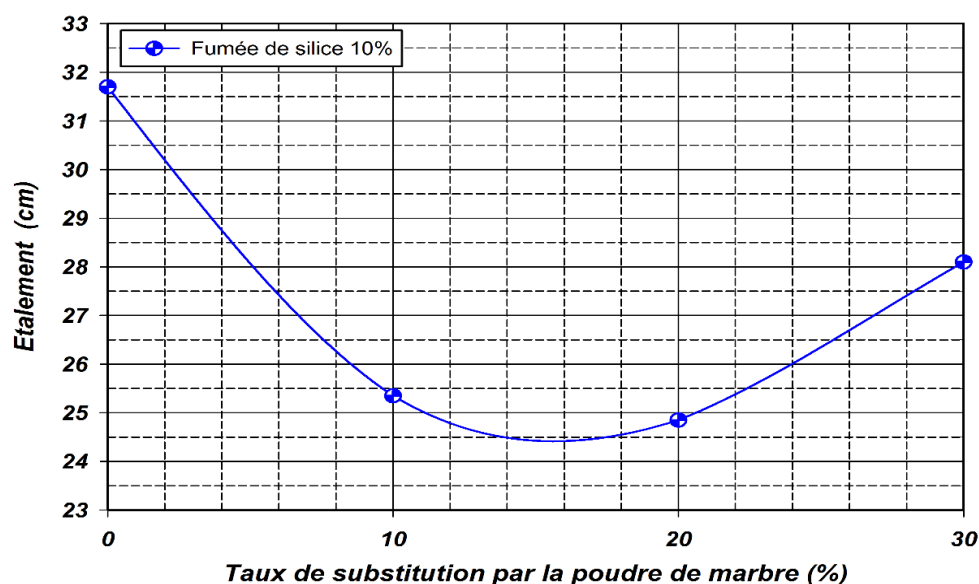


Figure 4-24. Effet de la fumée de silice sur les mortiers ternaire (Ciment +10% fumée de silice +X% poudre de marbre) sur l'étalement des mortiers.

La figure montre que le diamètre d'étalement diminue avec l'augmentation de la teneur en ajouts. Des valeurs d'étalement comprises entre (24.85 à 28.1 cm) ont été observées. on notera cependant que le mortier (10% FS + 30% PM) présente la valeur maximale d'étalement égal 28.1 cm. On observe que l'augmentation de la quantité fumée de silice affecte négativement l'ouvrabilité et la propriété rhéologique. Ceci est dû à l'absorption d'eau consommation de superplastifiant et par fumée de silice. On remarque dans le mortier binaire base de 30% de poudre de marbre la présence de problème de ressuage par contre dans mortier ternaire à 30% de poudre de marbre ce problème n'existe pas.

4.4.2.3 Temps d'écoulement par le V-funnel

L'évolution des temps d'écoulements des mortier autoplaçant à base des ciments ternaires en fonction de la teneur en fumée de silice (10%) et la poudre de marbre est illustrée sur la figure 4.25.

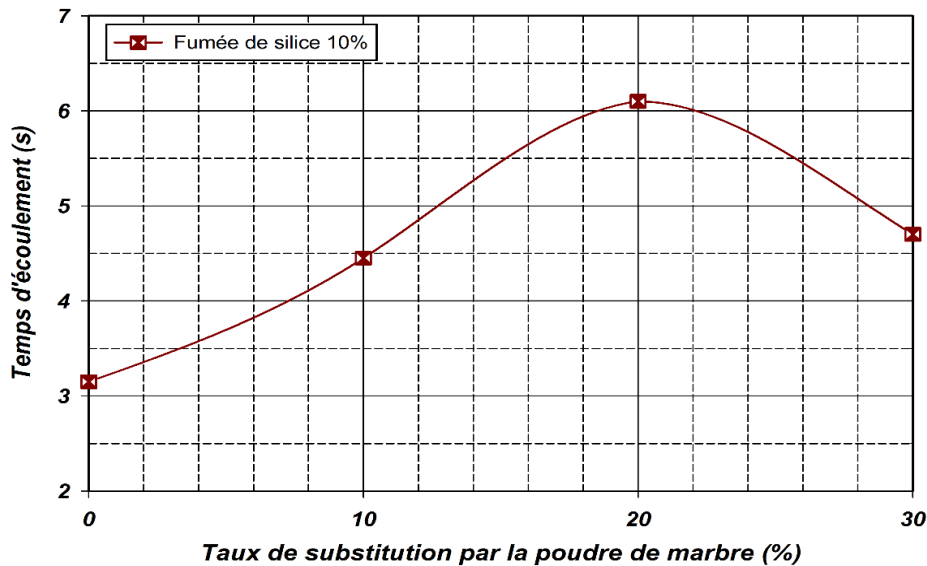


Figure 4-25. Effet de la fumée de silice sur les mortiers ternaire (Ciment +10% fumée de silice +X% poudre de marbre) sur l'étalement des mortiers.

D'après les résultats obtenus, on constate une du temps d'écoulement diminue par rapport à celui de mortier binaire à base de la fumée de silice mais encore élevé par rapport au mortier de référence, ajouter à cela nous avons remarqué que le temps de tous les mortiers autoplaçant est reste dans le domaine efficace ($T_e = 2$ à 10 s).

La substitution du ciment par la fumée de silice (10%) et poudre a affecté négativement sur l'ouvrabilité des mortiers à l'exception de mortier avec 10% de fumée de silice et 30% poudre de marbre.

4.4.3 Effet de l'ajustement de superplastifiant

Le tableau (4.7) montre les différentes compositions et les résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers ternaire avec différent du dosage supreplastifiant.

Tableau 4-7. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants ternaires avec 10% fumé de silice avec dosage de superplastifiant variable

Substitution du ciment par la fumée de silice et la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) constant					
Mélange pour 1m ³		M _{réf}	M ₁₃	M ₁₄	M ₁₅
Ciment (%)		100	80	70	60
Fumée de silice (%)		0	10	10	10
Poudre de Marbre (%)		0	10	20	30
Constituants du mélange	Ciment (kg)	753,66	593,74	518,18	443,00
	Fumée de silice (kg)	0	74,21	74,027	73,83
	Poudre de Marbre (kg)	0	74,21	148,05	221,50
	Sable en (g)	1197,00			
	Eau (kg)	306.14	301.02	300.22	300.45
	SP (%)	0.8	1	1	0.8
	SP (kg)	6,02	7,422	7,403	5,907
Etalement (cm)		31.7	30.85	27.45	28.1
Temps d'écoulement (sec)		3.15	2.96	4.50	4.7
Viscosité (Pa.s)		2.26	1,25	2,41	3,77
Seuil de cisaillement (Pa)		8.25	2,61	9,18	11,21
Remarque		Mortier homogène			

4.4.3.1 Mesure des paramètres rhéologiques

La figure (4.26) Représente schématiquement l'évolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant confectionnés à base de ciment ternaire composé de fumée de silice (10%) et de la poudre de marbre variés à 10%, 20% et 30% avec des dosages en superplastifiant variables .

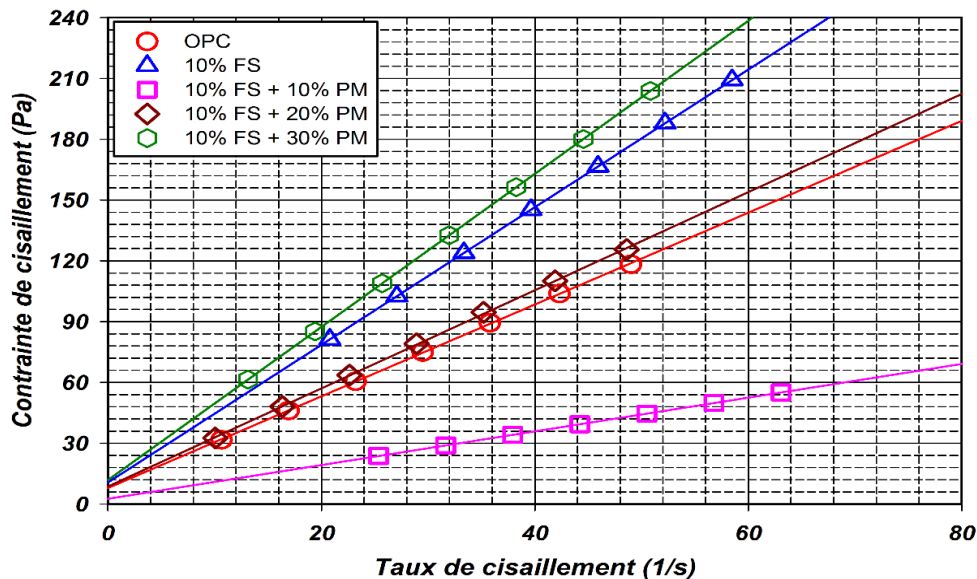


Figure 4.26. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de fumée de silice et poudre de marbre avec SP variable.

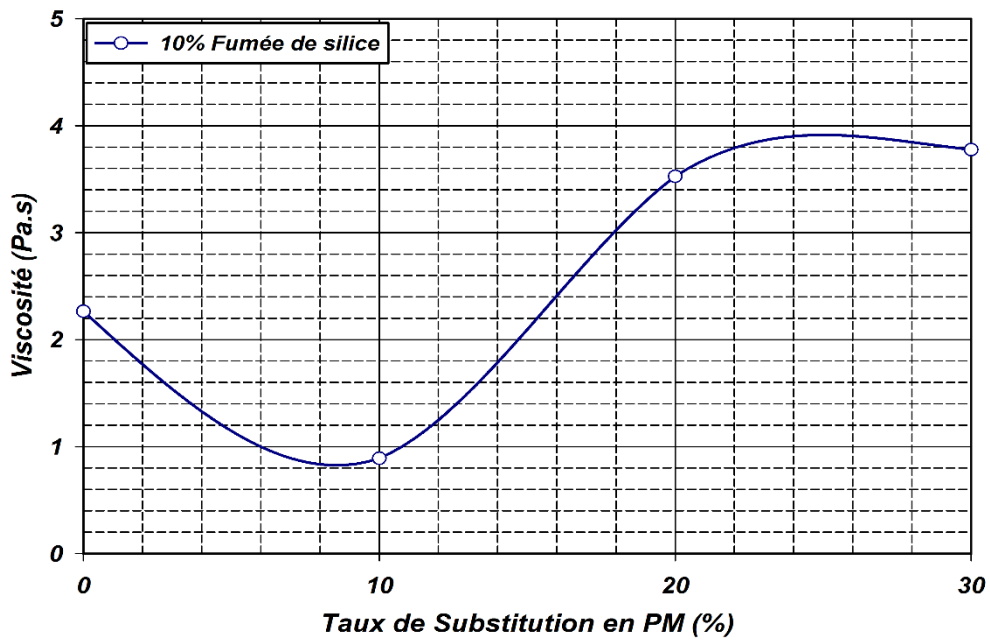


Figure 4.27. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de fumée de silice et poudre de marbre.

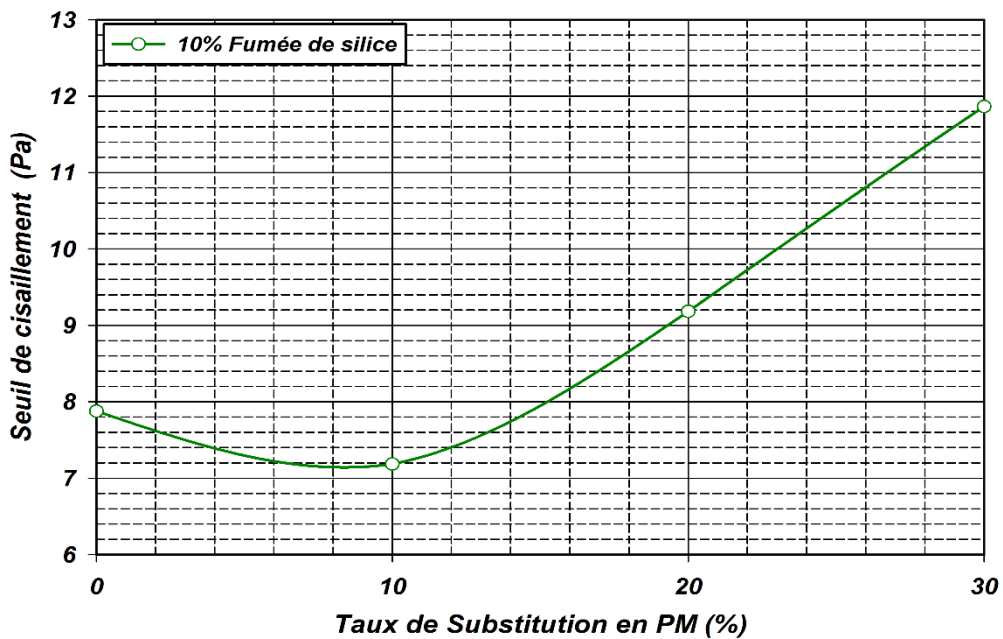


Figure 4.28. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de fumée de silice et poudre de marbre.

Les figures 4.26, 4.27 et 4.28 montre que les mélanges l'augmentation de pourcentage à 1% de superplastifiant provoque une diminution de seuil de cisaillement et de la viscosité par rapport au mortier de référence pour le mortier avec 10% FS + 10% PM, ce qui montre l'effet bénéfique de la poudre de marbre sur les paramètres rhéologiques du mortier ternaire.

On remarque aussi la diminution de seuil de cisaillement pour mortier à base de ciment ternaire avec un dosage de SP variable par rapport à celle des mortiers avec SP constant est cela est due à l'augmentation du dosage de superplastifiant.

Par ailleurs nous avons remarqué une augmentation de seuil de cisaillement et de viscosité par rapport au mortier autoplaçant de référence ont été menu par la substitution de ciment de 30% à 40%.

4.4.3.2 Etalement

La figure (4.27) présente les résultats des étalements de mortier ternaire (10% FS + X% PM), avec un SP variable.

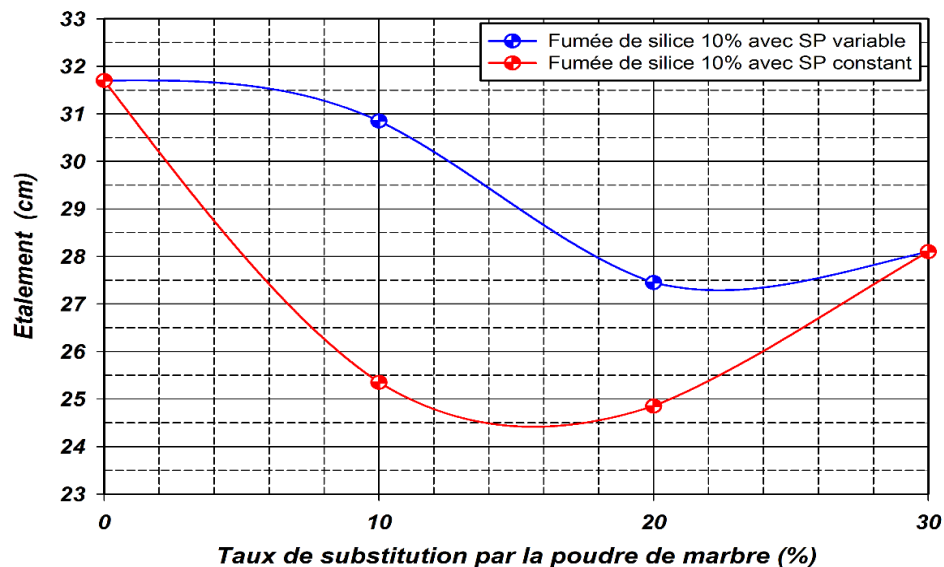


Figure 4.29. Influence de la correction du dosage en supreplastifiant sur l'étalement

D'après la figure (4.27) on remarque l'ouvrabilité de mélange corrigé s'élève par rapport mortier avec un SP constant par conséquent le diamètre d'étalement croit avec la teneur de supreplastifiant passe de 1% à 1.2%.

4.4.3.3 Temps d'écoulement par le V-funnel

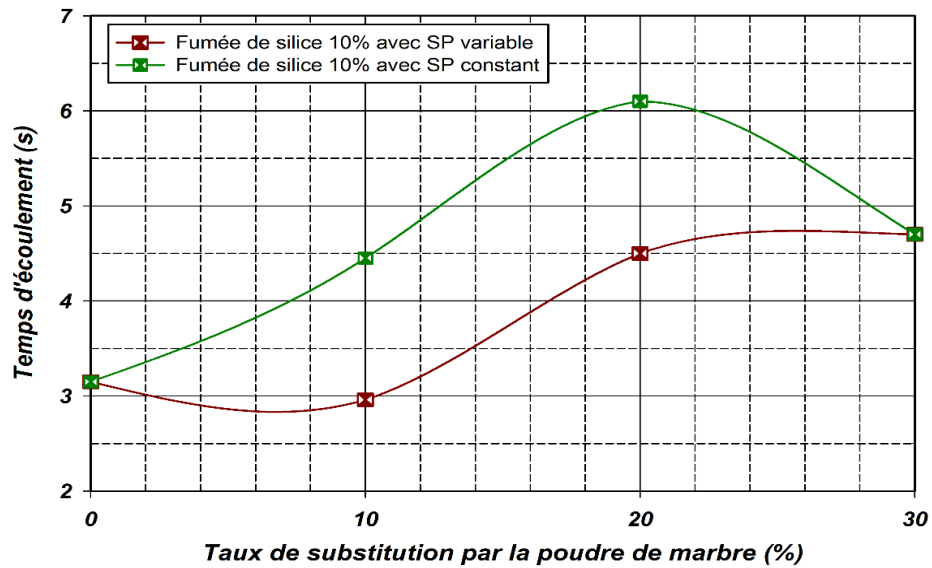


Figure 4.30. Influence de la correction du dosage en supreplastifiant sur temps de d'écoulement.

Un comportement similaire est aussi remarqué pour l'essai de l'écoulement par V-funnel, on remarque que le temps d'écoulement pour les mortiers avec un dosage en SP supplémentaire diminue remarquablement par rapport au mortier avec SP constant, d'où l'effet bénéfique de superplastifiant si on veut changer les propriétés rhéologiques.

4.4.4 Effet du couple 15% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre

Afin d'analyser l'influence combiné de la fumée de silice et a poudre de marbre sur l'ouvrabilité de mortier autoplaçant à l'état frais. Ces derniers ont été confectionnés à base de trois composants (fumée de silice à fixe 15% et poudre de marbre et bien sûr ciment). Les pourcentages de différents Constituants de mélange sont récapitulés dans le tableau (4.8) :

Tableau 4-8. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants ternaires avec 15% fumé de silice avec dosage de super plastifiant constant

Substitution du ciment par la fumée de silice et la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) constant					
Mélange pour 1m ³		M _{réf}	M ₁₆	M ₁₇	M ₁₈
Ciment (%)		100	75	65	55
Fumée de silice (%)		0	15	15	15
Poudre de Marbre (%)		0	10	20	30
Constituants du mélange	Ciment (kg)	753,66	553,31	478,27	403,61
	Fumée de silice (kg)	0	110,66	110,37	110,07
	Poudre de Marbre k(g)	0	73,77	147,16	220,15
	Sable en (kg)	1197,00			
	Eau (g)	306.14	300.22	299.40	298.58
	SP (%)	0.8			
	SP (kg)	6,02	5,90	5,88	5,90
Etalement (cm)		31.7	19.1	23.05	23.1
Temps d'écoulement (sec)		3.15	10.80	5.97	4.58
Viscosité (Pa.s)		2,26	3,23	2,67	2,29
Seuil de cisaillement (Pa)		8,25	10,15	8,40	7,20
Remarque		Perte d'ouvrabilité			

4.4.4.1 Mesure des paramètres rhéologiques

La figure (4.29) représente évolution de contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de la fumée de silice et de la poudre de marbre.

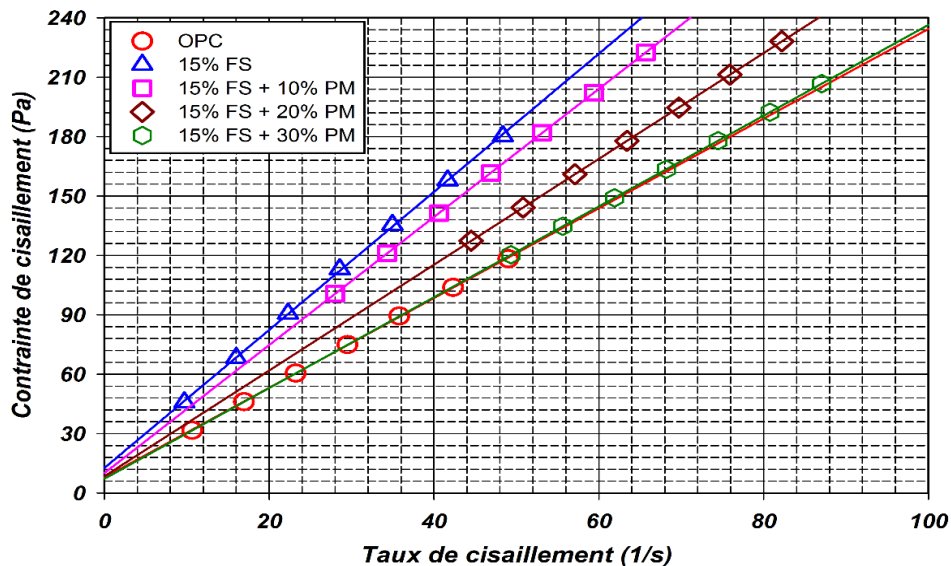


Figure 4.31. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de 15% de fumée de silice et poudre de avec SP constant.

La figure (4.29) montre que tous les mélanges à base des ciments ternaires sont compris entre le mortier de référence et celle du mortier avec seulement 15% de la fumée de

silice. Ce qui implique l'utilité d'utilisation de la poudre de marbre pour diminuer les paramètres rhéologiques est cela par le biais de l'effet de dilution assurée par ces fillers calcaire. Les figures 4.32 et 4.33 confirment cela par une réduction de la viscosité et de seuil de cisaillement au-delà de 10% de poudre de marbre on remarque une chute des paramètres rhéologiques des mélanges à base des ciments ternaires. A cet effet on a conclu que les mélanges ternaires avec 15% de fumée de silice et 10, 20 et 30% de poudre de marbre sont plus moins visqueux en fonction du dosage de poudre de marbre.

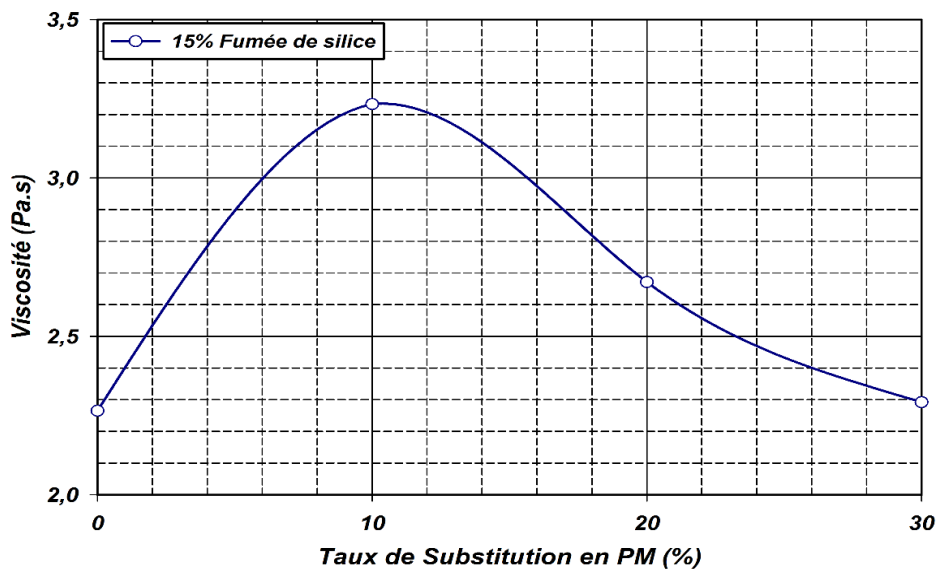


Figure 4.32. Variation de viscosité des mélanges ternaires avec 15% FS.

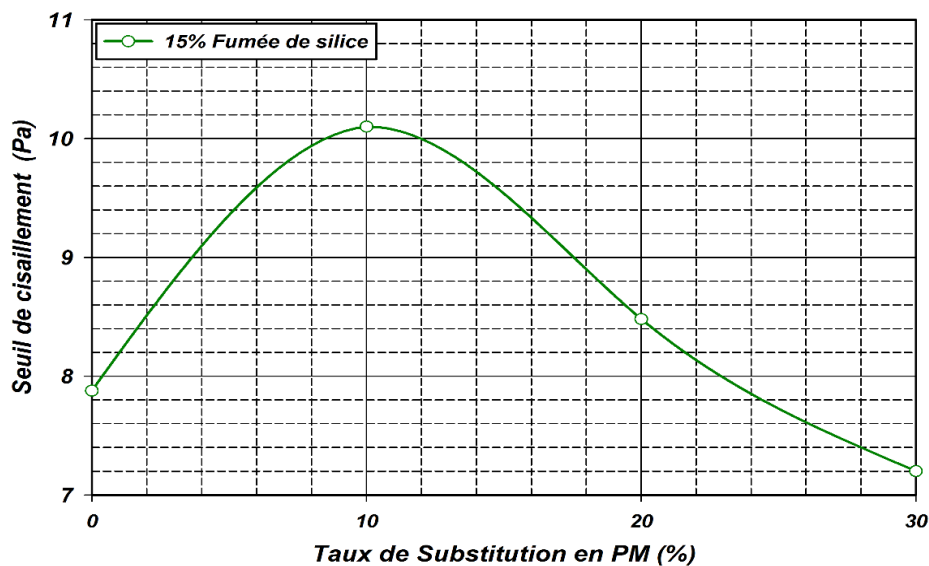


Figure 4.33. Variation de seuil de cisaillement des mélanges ternaires avec 15% FS.

4.4.4.2 Etalement

Les résultats d'étalement des mortiers ternaires composé de (ciment + 15% de fumée de silice et poudre de marbre 10%, 20% et 30%). Notons que le dosage du superplastifiant constant à 0.8%

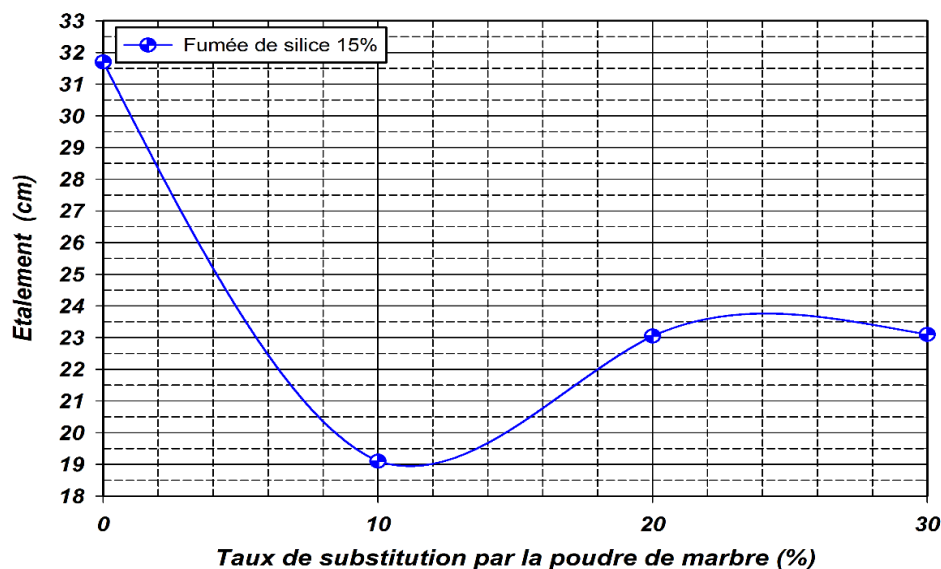


Figure 4.34. Effet du couple 15% de fumée de silice et poudre de marbre sur l'étalement

A travers les résultats précédents on note la réduction à paramètres rhéologiques. On constate que les diamètres d'étalement des mortiers sont à l'intérieur de l'intervalle [19,1 à 23,1 cm]. Ces résultats semblent être insuffisants pour juger que le mortier soit autoplaçant, dans ce cas-là la correction semble être nécessaire par l'augmentation de dosage en superplastifiant. Ceci est dû à la demande élevée en eau fumée de silice pour obtenir la fluidité désirée d'une part, et d'autre part à l'augmentation de compacité des mélanges est cela dû à la finesse élevé des ajouts (fumée de silice et poudre de marbre).

4.4.4.3 Temps d'écoulement par le V-funnel

Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du pourcentage de la fumée de silice et de la poudre de marbre sont représentés dans la figure (4.35).

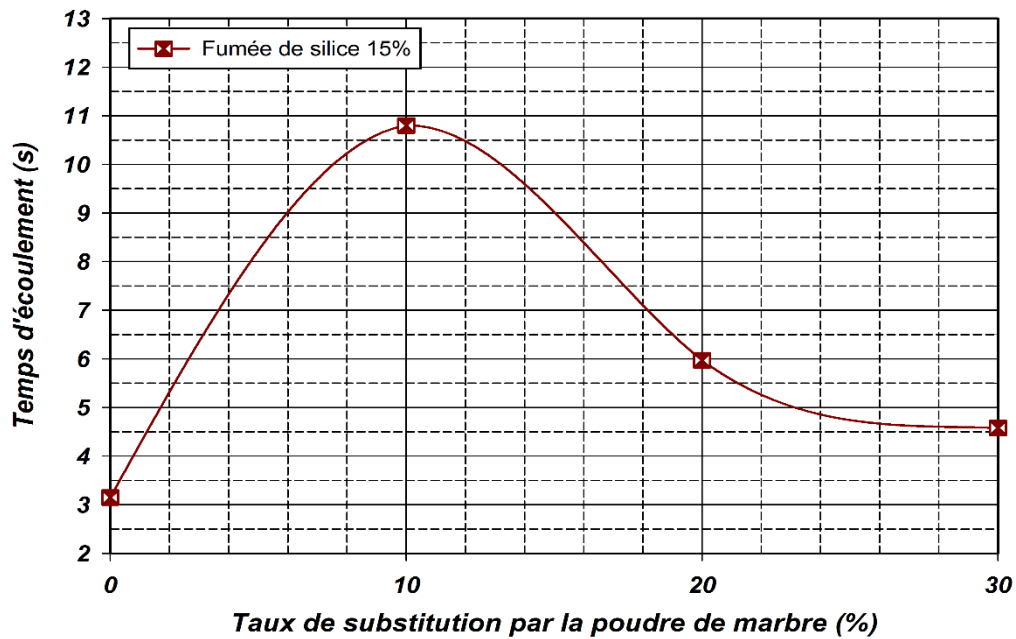


Figure 4.35. Effet du couple fumée de silice et poudre de marbre sur temps d'écoulement

On voit bien que l'augmentation de la quantité de fumée de silice jusqu'à 15% avec des quantités de poudre de marbre de 10%, 20% et 30% accroît le temps d'écoulement de mortier ternaires avec 10% de poudre de marbre. Au-delà de 10% de poudre de marbre les mélanges semblent moins visqueux et cela traduit par une diminution de temps d'écoulement entre 4,5 s et 6 s. Donc la introduction de poudre de marbre améliore le temps mais le temps d'écoulement de mortier étudié est encore loin du temps de référence.

4.4.5 Effet de l'ajustement de superplastifiant

Le tableau (4.9) montre les compositions et résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers ternaires avec un ajustement de SP.

Pour améliorer l'ouvrabilité des mortiers auto-plaçants, il est nécessaire d'ajuster le dosage en superplastifiant. A cet effet nous avons recommencé les essais avec le même principe de composition et un ajustement en dosage de superplastifiant.

Tableau 4-9. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants ternaires avec 15% fumé de silice avec dosage de super plastifiant variable

Substitution du ciment par la fumée de silice et la poudre de marbre avec un dosage de SP (%) variable					
Mélange pour 1m ³		M _{réf}	M ₁₆	M ₁₇	M ₁₈
Ciment (%)		100	75	65	55
Fumée de silice (%)		0	15	15	15
Poudre de Marbre (%)		0	10	20	30
Constituants du mélange	Ciment (kg)	753,66	553,31	478,27	403,61
	Fumée de silice (kg)	0	110,66	110,37	110,07
	Poudre de Marbre (kg)	0	73,77	147,16	220,15
	Sable en (kg)	1197,00			
	Eau (g)	306.14	300.22	299.40	298.58
	SP (%)	0.8	1.2	1.2	1.2
	SP (kg)	6,02	8,85	8,83	8,80
Etalement (cm)		31.7	29.75	28.85	28.00
Temps d'écoulement (sec)		3.15	4.30	5.74	5.59
Viscosité (Pa.s)		2,26	2,57	2,88	2,62
Seuil de cisaillement (Pa)		8.25	8,07	10,49	10,18
Remarque		Mortier fluide			

4.4.5.1 Mesure des paramètres rhéologiques

La figure (4.36) montre évolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de 15% fumée de silice et poudre de marbre. On remarque une variation linéaire ce qui représente bien un comportement Binghamien.

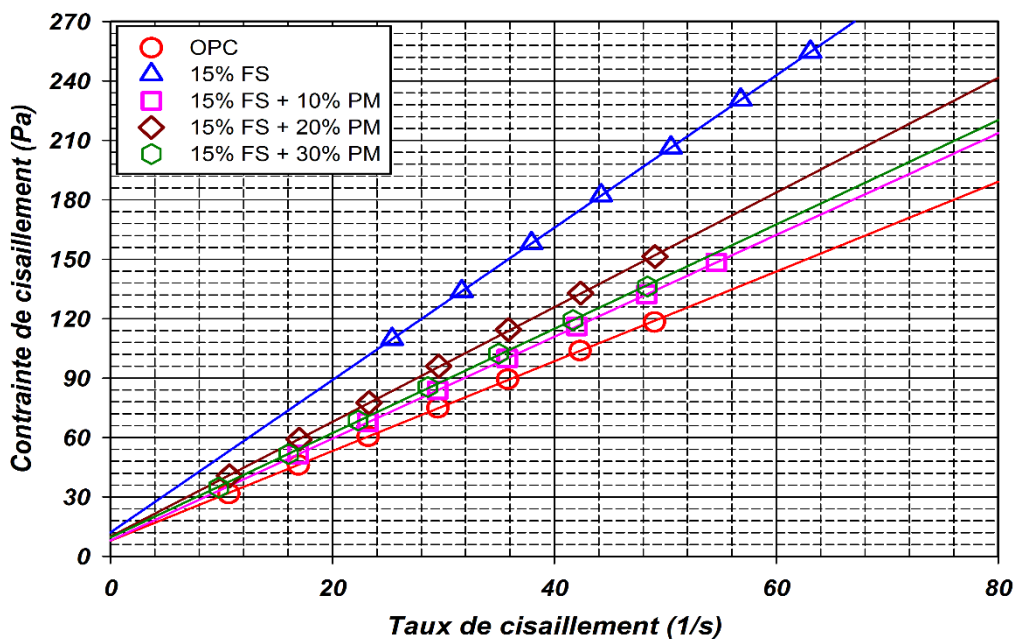


Figure 4.36. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de 15% de fumée de silice et poudre de avec SP variable.

La figure (4.36) décrit le comportement rhéologique du mortier ternaire en fonction de dosage de fumée de silice et poudre de marbre avec l'ajustement en superplastifiant. L'addition de la fumée de silice et poudre de marbre obéi à cette condition par un ajustement du dosage en superplastifiant ou on remarque une diminution de la viscosité et de seuil de cisaillement des mortiers autoplaçant par rapport aux mortiers avec un SP constant (figures 4.37 et 4.38).

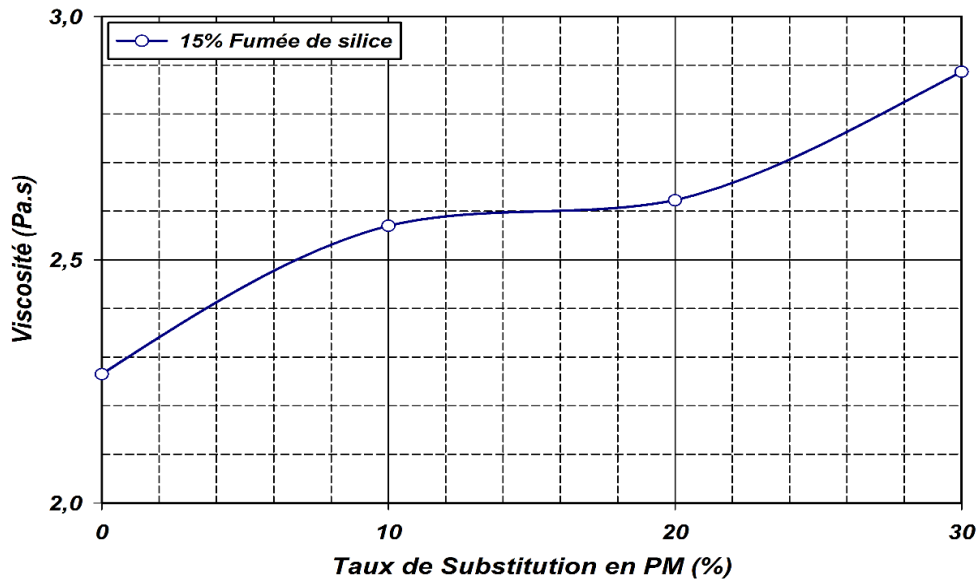


Figure 4.37. Variation de viscosité du mortier ternaire (15% FS+X% PM) avec SP variable.

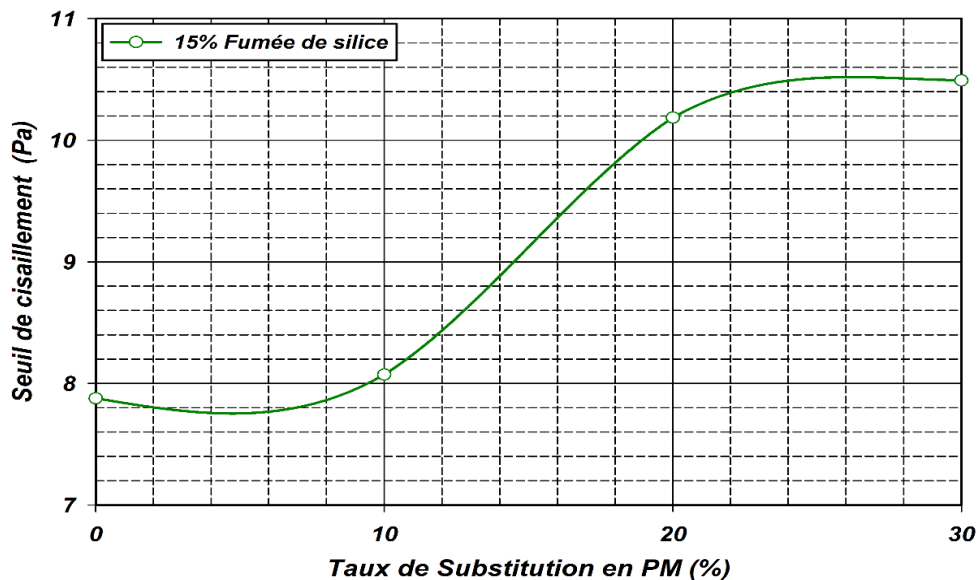


Figure 4.38. Variation de seuil de cisaillement du mortier ternaire (15% FS+X% PM) avec SP variable.

4.4.5.2 Etalement

Les figures 4.39 et 4.40 regroupes les différents résultats d'étalement et le temps d'écoulement par mini V-funnel pour les mortiers à base des ciments ternaires avec 15% de la fumée de silice et 10, 20 et 30% de la poudre de marbre. Après avoir l'effet de ces additions sur l'ouvrabilité des mortiers dans une section précédente, on va entamer à la correction on ajoute une quantité supplémentaire de superplastifiant.

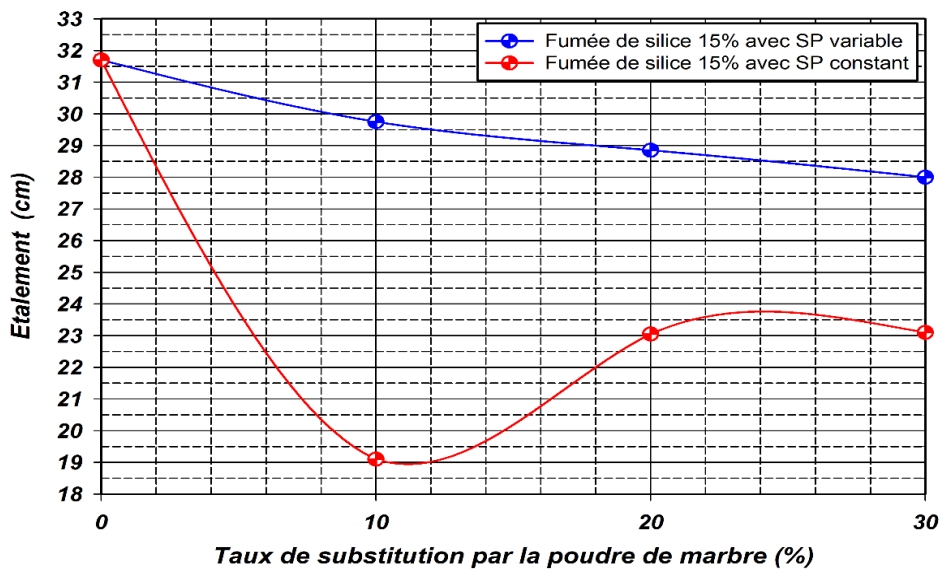


Figure 4.39. Effet d'ajustement du dosage en SP sur l'étalement.

4.4.5.3 Temps d'écoulement par le V-funnel

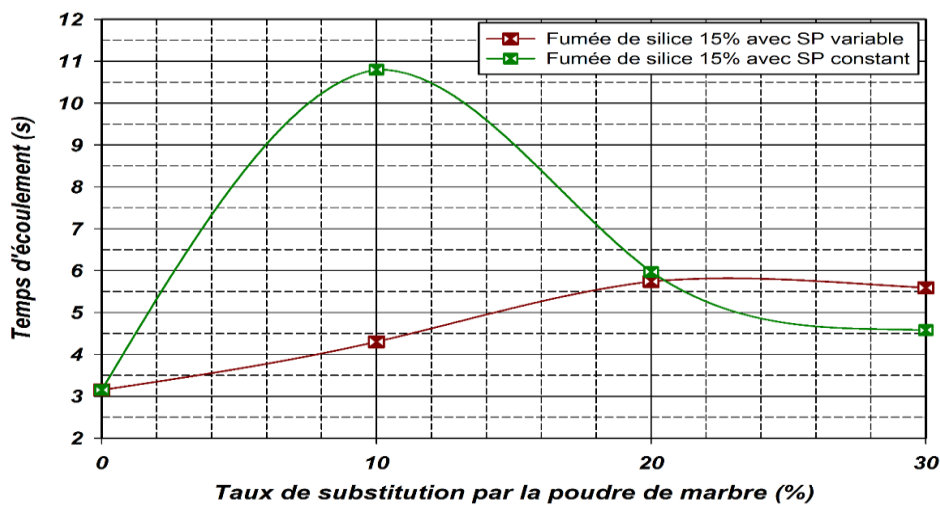


Figure 4.40. Effet d'ajustement du dosage en SP sur le temps d'écoulement.

Ces figures montrent que, l'ajustement du dosage en SP de 1,2% conduit à une diminution significative de l'étalement et temps d'écoulement par rapport au mortier avec SP constant. Pour un dosage en superplastifiant de 1.2% les mortiers ternaires entré dans la gamme des mortiers autoplaçants.

4.4.6 Effet des fibres sur les propriétés rhéologiques

Étude rhéologique de mortier autoplaçant binaire (fumée de silice avec des fibres synthétiques) Généralement l'ajout des fibres sont utilisé pour but d'améliorer les performances physico-mécanique ce qui est important à mentionner que l'addition des fibres influe directement sur la rhéologie des mortiers autoplaçant à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP.

Afin d'évaluer les modifications induites par la fumée de silice sur comportement rhéologique. Nous avons testé trois compositions des mortiers binaires à base de fumée de silice, avec un taux de substitution de ciment par la fumée de silice variant entre 5, 10 et 15 % et on ajoute des fibres synthétiques de 0.25% de masse de mortier.

Tableau 4-10. Composition et résultats des essais sur des mortiers autoplaçants binaire à base du fumé de silice avec dosage de superplastifiant variable.

Substitution du ciment par la fumée de silice avec un dosage de SP (%) variable et 0.25% des fibres synthétiques					
Mélange pour 1m ³		M _{réf}	M _{4f}	M _{5f}	M _{6f}
Fumée de silice (%)		0	5%	10%	15%
Constituants du mélange	Ciment (kg)	753,66	711,98	669,98	629,02
	Fumée de silice (kg)	0	37,47	74,44	111,00
	Sable en (kg)	1197,00			
	Eau (kg)	306.14	304.33	302.75	300.91
	SP (%)	0.8	1.9		
	SP (kg)	6,02	14,24	14,15	21.09
Étalement (cm)		31.7	Aucun étalement		
Temps d'écoulement (sec)		3.15	Blocage		
Viscosité (Pa.s)		2.26	3,88	3,67	3,14
Seuil de cisaillement (Pa)		8.25	12,77	12,08	9,86
Remarque		Mortier homogène	Perte ouvrabilité		

4.4.6.1 Mesure des paramètres rhéologiques

Les résultats obtenus représenté graphiquement sur le rhéogramme (Figure 4.41), montrent que l'influence des fibres sur propriété rhéologique (viscosité et seuil de cisaillement), on remarque que les courbes de comportement rhéologique se situer au-dessus de courbe de références.

Nous avons opté à faire des essais préliminaires tout en variant le taux d'addition des fibres synthétiques de 1%, 0.5% et 0.25% de la masse totale de mortier avec une correction du dosage en superplastifiant varie de 0.8, 1.2, 1.5 et 1.9.

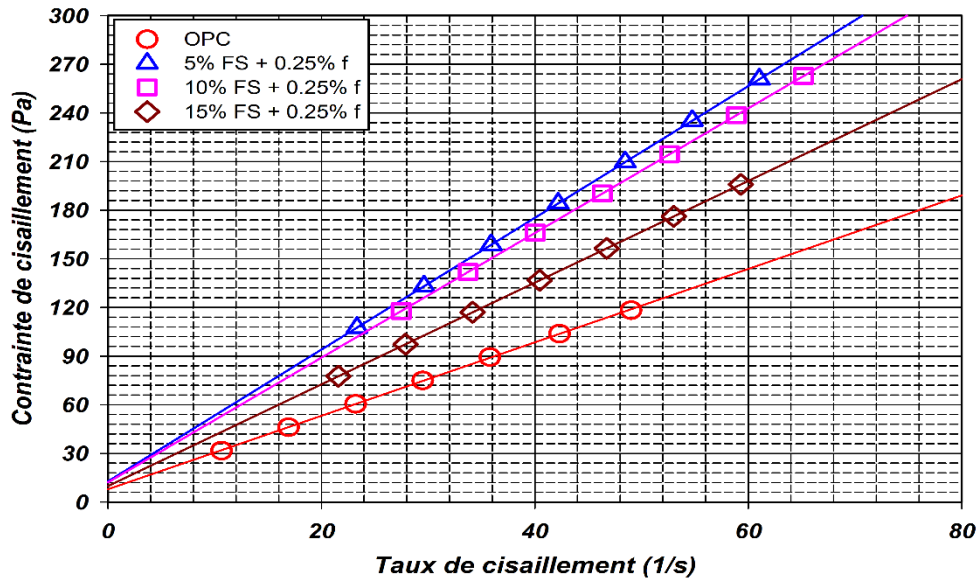


Figure 4.41. Evolution de taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement du mortier autoplaçant en fonction de dosage de fumée de silice et 0.25% des fibres avec SP variable.

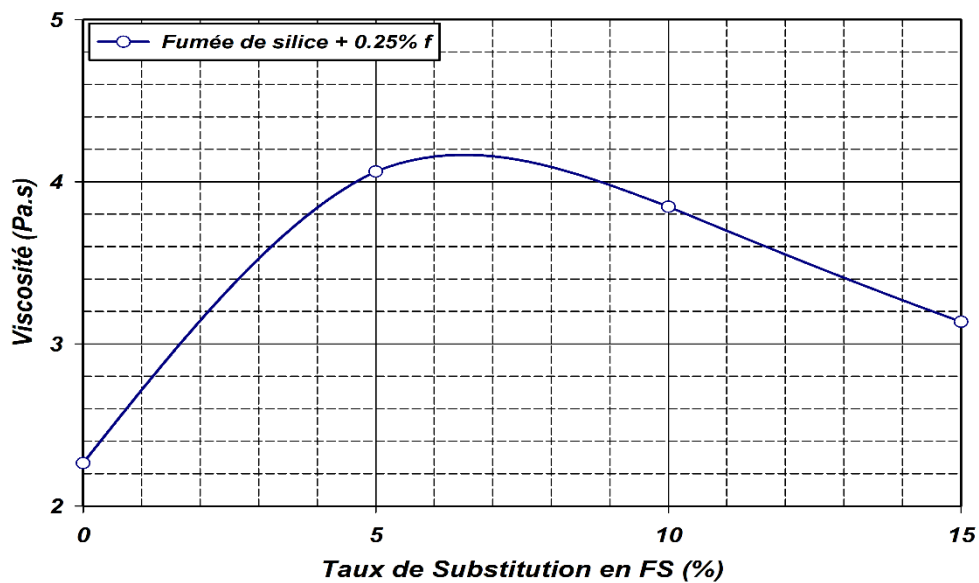


Figure 4.3. Variation de viscosité du mortier autoplaçant renforcé par des fibres.

A travers les figures 4.42 et 4.43 on remarque que la courbe a atteint une valeur optimale pour un taux de substitution de 5% fumée de silice puis on remarque diminution de la viscosité qui atteint une valeur minimum égale 3.14 pour le dosage de 15% fumée de silice.

Il a été observé qu'il n'est pas possible avec la présence des fibres synthétique d'avoir la propriété d'un mortier autoplaçant.

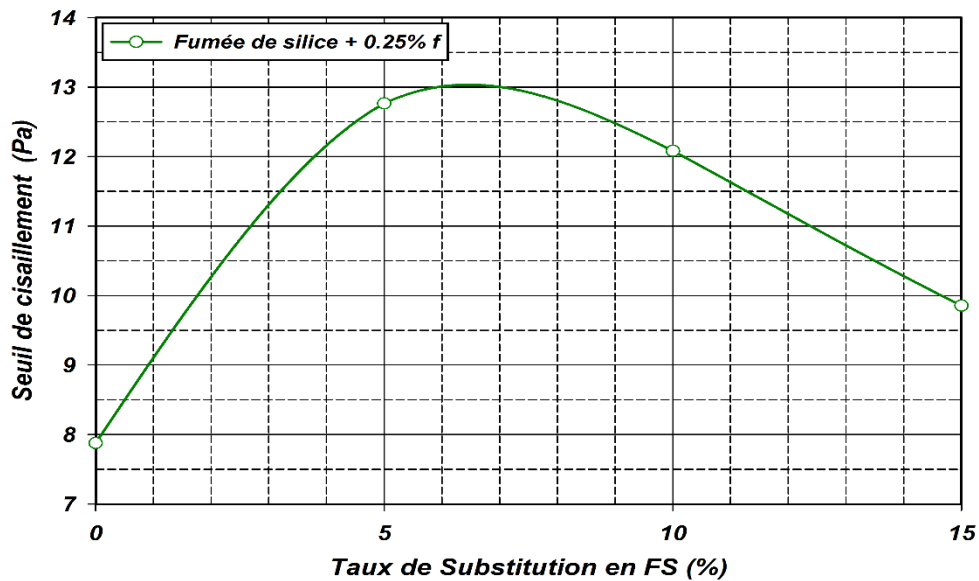


Figure 4.43. Variation de seuil de cisaillement du mortier autoplaçant renforcé par des fibres.

Afin d'assurer une ouvrabilité acceptable avec l'utilisation des fibres synthétique et dans le but d'améliorer certain caractéristique à l'état durci tel que le retrait, on n'a pas peut avoir avec ce type des fibres synthétiques l'autocompactibilité des mortiers toute en gardent le taux de substitution fixe et on variant le dosage en superplastifiant.

D'après les résultats obtenu nous avant remarque que l'introduction des fibres a affecté négativement le comportement rhéologique des mortiers et cela peut être expliqué par l'effet d'éclatement des fibres toute en bloquent le système.

En fin il faut rappeler que l'introduction des fibres influencé négativement la rhéologie des mélange ce qui traduit par une augmentation de sa viscosité et le seuil de cisaillement même avec l'optimisation du dosage en supreplastifiant.

4.5 Etude des propriétés mécanique des mortiers autoplaçant

Nous présentons dans cette partie les résultats des différent essais effectuée à l'état durci sur les mortiers confectionnées selon les différent combinaisons d'ajout (fumée de silice –poudre de marbre). Ces résultats portent sur les résistances mécaniques (compression) aux 3, 7, et 28 jours, retrait à 28 jours et l'absorption capillaire.

4.5.1 La résistance à la compression

4.5.1.1 Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des bétons autoplaçants binaire à base de fumée de silice sont résumés dans le tableau (4-11) La figure (4.44) la variation de la résistance à la compression du mortier autoplaçant binaire aux différents âges 3, 7 et 28 jours.

Tableau 4-11. Résistance à la compression des mortiers binaires à base sur fumée de silice

Résistance à la compression (M Pa)				
Age (jour)	OPC	5% FS	10% FS	15% FS
3	14.60	12.64	14.05	15.25
7	34.09	28.22	34.09	34.97
28	40.79	35.36	44.2	44.65

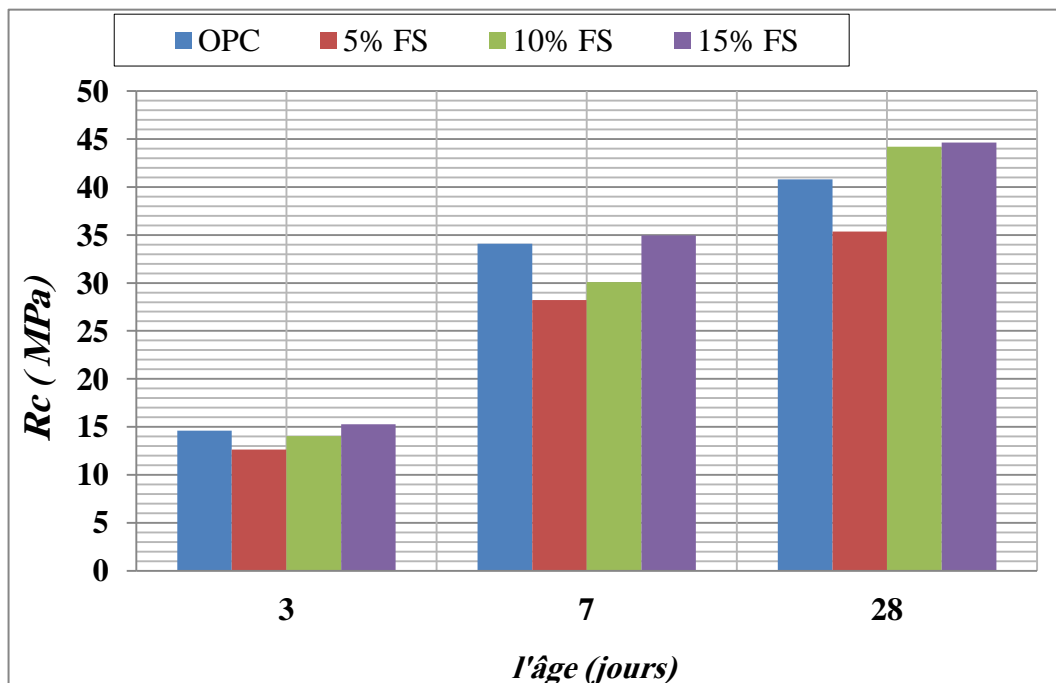


Figure 4.44. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant de la fumée de silice

Ces figures (4.44) 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 augmentent régulièrement avec augmentation dosage de fumée de silice en fonction de âge ne présentent aucune chute de résistance. À toutes les échéances, la résistance à la compression du mortier témoin composé de 100% de ciment est constamment élevée à l'exception des mortiers constitué de 15% fumée de silice la résistance augmenté légèrement à l'âge de 7 et 28. Cette augmentation de la résistance à la compression est due que l'activité pouzzolanique très active de la fumée de silice présente dans la pâte du ciment qui favorise la résistance à

long terme. La composition chimique de la fumée de silice présente une forte teneur en SiO_2 ce qui favorise l'activité pouzzolanique.

4.5.1.2 Effet de la poudre de marbre sur la résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des bétons autoplaçants binaire à base de poudre de marbre sont résumés dans le tableau (4-12). La figure (4.43) la variation de la résistance à la compression du mortier autoplaçant binaire aux différents âges 3, 7 et 28.

Tableau 4-12. Résistance à la compression des mortiers binaires à base sur la poudre de marbre

Résistance à la compression (MPa)				
Age (jour)	OPC	10% PM	20% PM	30% PM
3	14.60	31.90	22.18	16.94
7	34.09	34.35	30.09	21.24
28	40.79	39.43	33.40	24.52

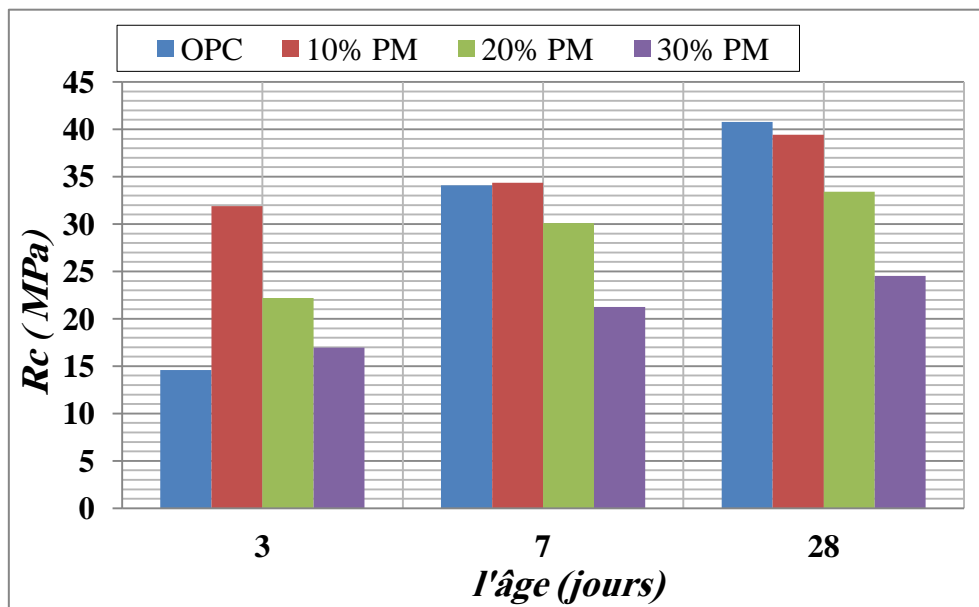


Figure 4.45. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant de la poudre de marbre

D'après a figure (4.43) on constate que la résistance à la compression diminue à fur et à mesure que l'âge augmente. En remarque que la résistance à jeune âge des mortiers binaires à base de la poudre de marbre donne des résistances parfois supérieur et parfois similaire à mortiers de référence.

Nous concluons par les résultats que la valeur optimale dans mortier binaire à base de poudre de marbre est 10% de poudre de marbre à 3, 7 et 28 jours.

Selon Belaidi A. S. E. [44] et Ouai A. et al. [41] 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.

Ceci est dû à la nature de la poudre de marbre qui appartient à la famille des fillers quasi inertes [56, 57, 58]. Ces fillers sont composées principalement de CaCO_3 . Cet élément accélère l'hydratation du C_3S , ce qui améliore les résistances aux jeunes âges [69, 60]. Néanmoins, l'effet associé de ces fillers est la réduction du potentiel pouzzolanique qui cause la diminution des résistances à long terme [61]. Autrement dit que, si le filler PM accélère l'hydratation des BAP au jeune âge, son effet a tendance à se stabiliser à long terme [62, 63].

4.5.1.3 Effet de la combinaison de la fumée de silice et de la poudre de marbre sur la résistance à la compression

Il est clairement les ajouts minérale actif ou inerte affectent l'état durci des mortiers autoplaçant, d'où leur effet sur la résistance à la compression des mortiers autoplaçant à base de fumée de silice et la poudre de marbre à âge (3, 7 et 28 jours) est représenté dans les tableaux 4.13, 4.14 et 4.15.

Tableau 4-13. Résistances à la compression des mortiers ternaires

Résistance à la compression (MPa)										
Âge (Jours)	OPC	5% FS			10% FS			15% FS		
		10% PM	20% PM	30% PM	10% PM	20% PM	30% PM	10% PM	20% PM	30% PM
3	14.60	14.22	13.62	14.52	15.97	12.44	13.75	23.05	28.35	17.51
7	34.09	22.62	22.51	18.09	27.37	26.10	15.62	38.80	39.98	27.06
28	40.79	37.9	23.95	23.3	45.39	30.37	26.26	34.1	31.75	46.93

4.5.1.3.1 Effet du couple 5% fumée de silice sur la résistance des mortiers ternaires

La figure 4.46 montre l'effet de coupe 5% FS et X% PM sur la résistance à la compression des mortiers autoplaçants.

D'après les résultats obtenus, on note une diminution de la résistance en fonction du temps pour l'ensemble des compositions. D'après la figure (4.46) on constate que la résistance à la compression diminue à fur et à mesure que l'âge augmente cette réduction de résistance et remarquable à 7 et 28 jours. Mais à court terme à 3 jours les résistances sont comparables à celle de références.

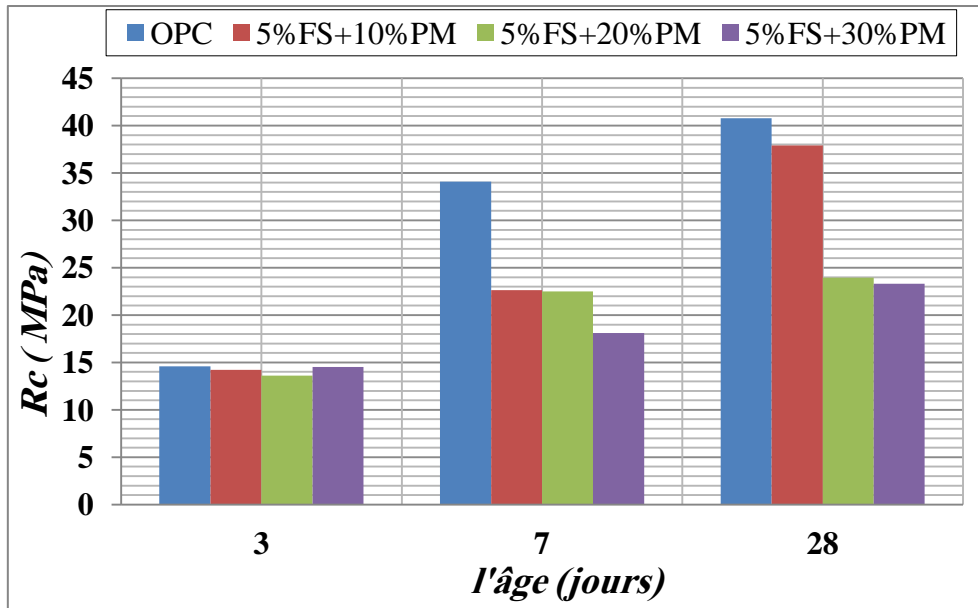


Figure 4.46. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre

4.5.1.3.2 Effet du couple 10% fumée de silice sur la résistance des mortiers ternaires

La figure 4.47 montre l'effet de couple 10% FS et X% PM sur la résistance à la compression des mortiers autoplaçants.

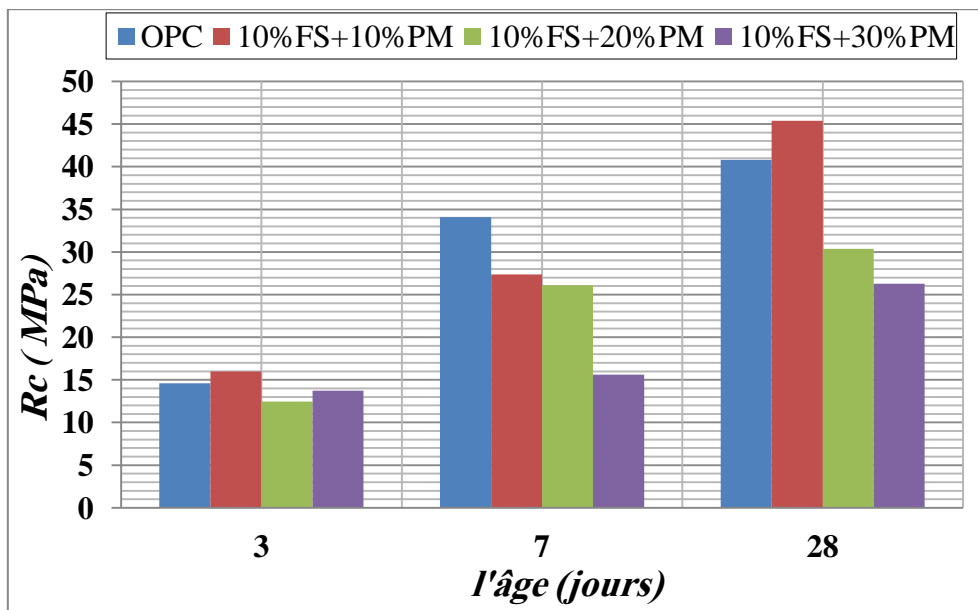


Figure 4.47. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre.

Un comportement similaire à la précédente (5%FS + X% PM), mais dans ce cas-là la présence d'un optimum pour le mortier avec 10%FS + 10% PM. Donc on peut conclure que

l'utilisation de 10% de fumée silice améliore considérablement la résistance à la compression est-ce là confirme les procédures de fabrications des ciments à base de la fumée de silice.

4.5.1.3.3 Effet du couple 15% fumée de silice sur la résistance des mortiers ternaires

La figure 4.48 montre l'effet de coupe 15% FS et X% PM sur la résistance à la compression des mortiers autoplaçants.

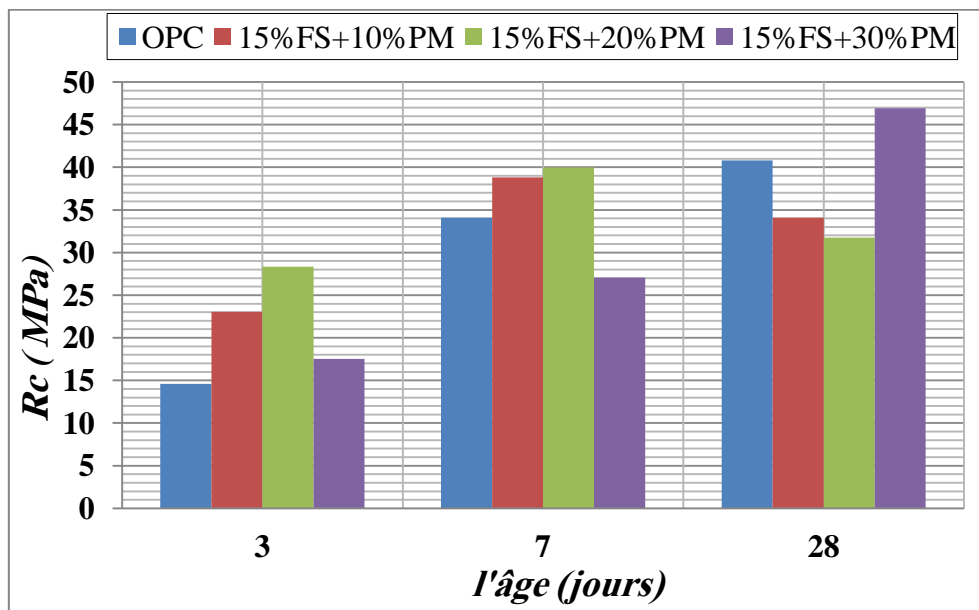


Figure 4.48. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% fumée de silice avec différent pourcentage de la poudre de marbre.

On remarque sur cette figure l'effet bénéfique de la combinaison de la fumée de silice et la poudre de marbre sur la résistance à la compression sur tous les âges 3, 7 et 28 jours. A l'exception de celle de la résistance à 28 jours avec la variante (15%FS+10%PM et 15%+20%PM) ou il y a une diminution par rapport à celle de référence. Les additions minérales améliorent les résistances mécaniques par effet de remplissage, et par effet pouzzolanique lorsqu'elles sont réactives. Le fumé de silice améliore les résistances à plus longues échéances par effet chimique (pouzzolanique),

4.5.2 Retrait

L'intérêt de l'étude de retrait consiste à l'évaluation de sa valeur pour prévoir le comportement du mortier au départ et prendre des précautions techniques nécessaires pour l'empêcher. En fait celui-ci peut causer des fissures relativement élevées qui favorisent les infiltrations d'eau à des constructions. Les résultats de l'essai de retrait sont présentés ci-dessous

4.5.2.1 Effet de la fumée de silice sur le retrait

La figure 4.49 présente la variation du retrait en fonction d'âge (28 jours) pour les mortiers à base de la fumée de silice.

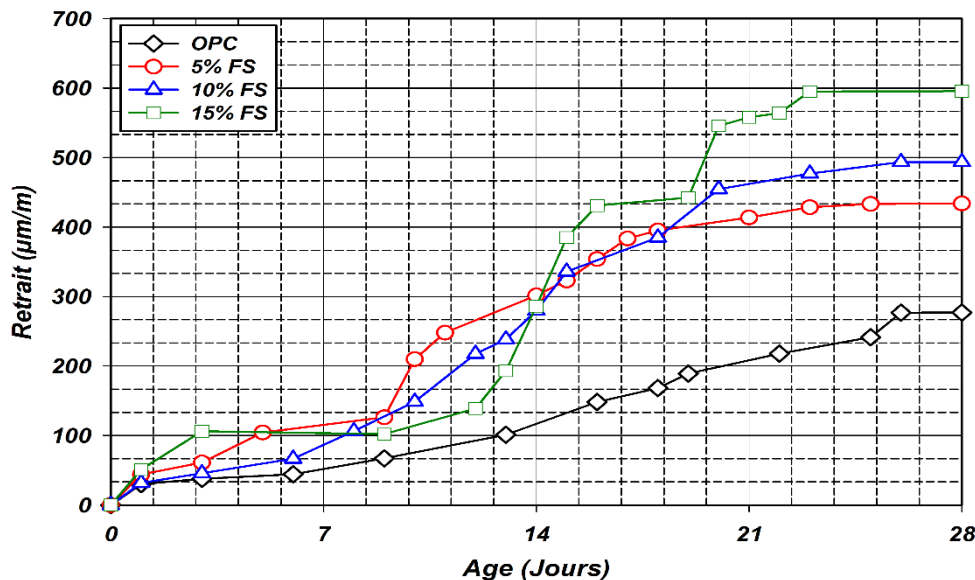


Figure 4.49. montre la variation du retrait des mortiers binaire base à la fumée de silice en fonction de l'âge.

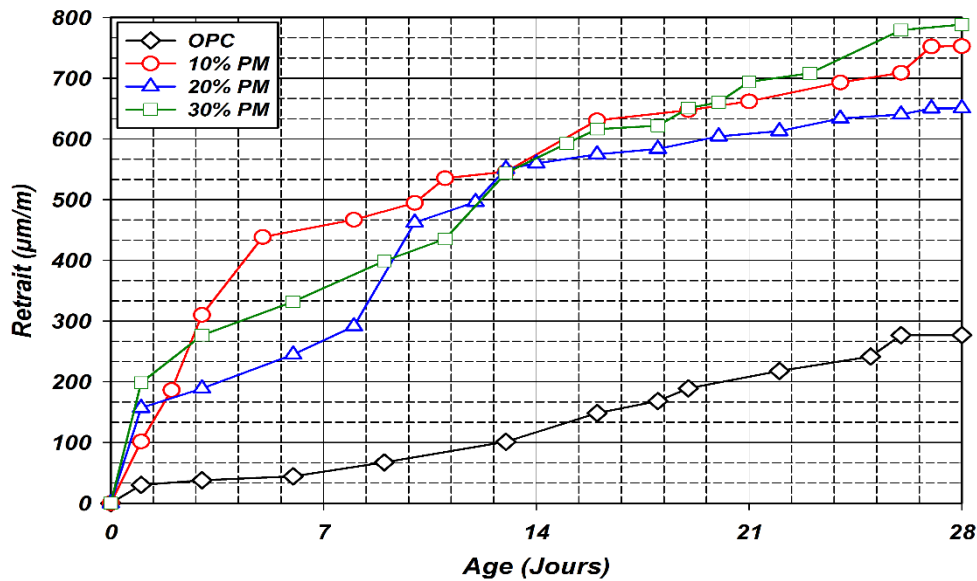
Les résultats présentés si dessus montrent nettement que l'introduction d'ajouts minéraux (la fumée de silice) en substitution de ciment avec des pourcentages de 5%, 10% et 15 % affecte négativement la variation dimensionnelle (retrait) dans le temps qui accroît avec l'augmentation du taux de substitution.

Les résultats obtenus montrent l'effet de fumée de silice sur le retrait est très significatif au jeune âge et à long terme parce que la fumée de silice augmente la quantité de C-H-S qui est facteur important qui conduit au retrait 28 jour (la activée pouzzolanique de la fumée de silice était complète au jeune âge et à long terme).

Donc l'ajout du fumé de silice augmente le retrait des mortiers autoplaçant binaires (Ciment + Fumé de silice) par rapport au mortier de référence.

4.5.2.2 Effet de la poudre de marbre sur le retrait

La figure 4.50 présente la variation du retrait en fonction d'âge (28 jours) pour les mortiers à base de la poudre de marbre.



La figure 4.50 illustre les variations de retrait de mortier binaire base à la poudre de marbre en fonction de l'âge.

D'après la figure (4.50) on remarque le retrait de mortier binaire base à la poudre de marbre montre une augmentation de retrait a jeune âge et à 28 jours et supérieur à celle de la fumée de silice de l'ordre supérieur à 600 µm/m.

L'utilisation d'une importante quantité en matières fines aurait pu développer le retrait, une remarquable augmentation de retrait est clairement décrite l'influence de l'ajout de la poudre de marbre en remplacement du ciment à cet égard une évolution du retrait considérablement élevé par rapport au témoin.

4.5.2.3 Effet de la combinaison de la fumée de silice et de la poudre de marbre sur retrait

4.5.2.3.1 Effet du couple 5% fumée de silice sur le retrait des mortiers ternaires

La figure 4.51 présente la variation du retrait en fonction d'âge (28 jours) pour les mortiers à base de 5% de la fumée de silice et 10, 20 et 30% de la poudre de marbre.

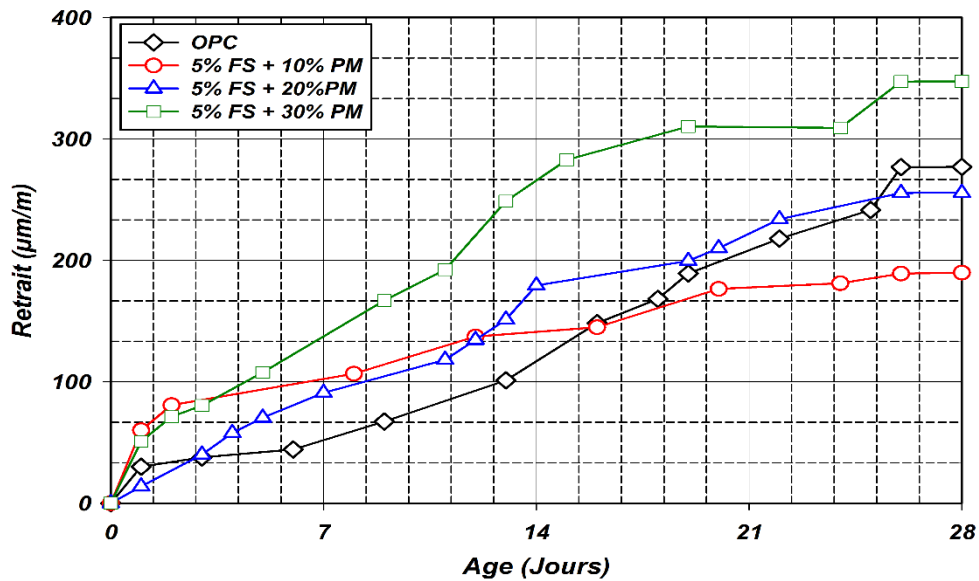


Figure 4.51. Variation du retrait des mortiers ternaire base de 5% FS + X% PM.

La substitution de ciment par la poudre avec des taux de 10%, 20% et 30% et la fumée de silice avec un taux fixe de 5% a apporté un effet positif en diminuant le retrait à partir du 16^{ème} et 27^{ème} jours pour le deux premier successivement tandis-que le troisième (5% FS+30%PM) on constate une augmentation du retrait par rapport au mortier de référence et cela est dû la forte quantité de la poudre de marbre utilisé.

4.5.2.3.2 Effet du couple 10% fumée de silice sur le retrait des mortiers ternaires

La figure 4.52 présente la variation du retrait en fonction d'âge (28 jours) pour les mortiers à base de 10% de la fumée de silice et 10, 20 et 30% de la poudre de marbre.

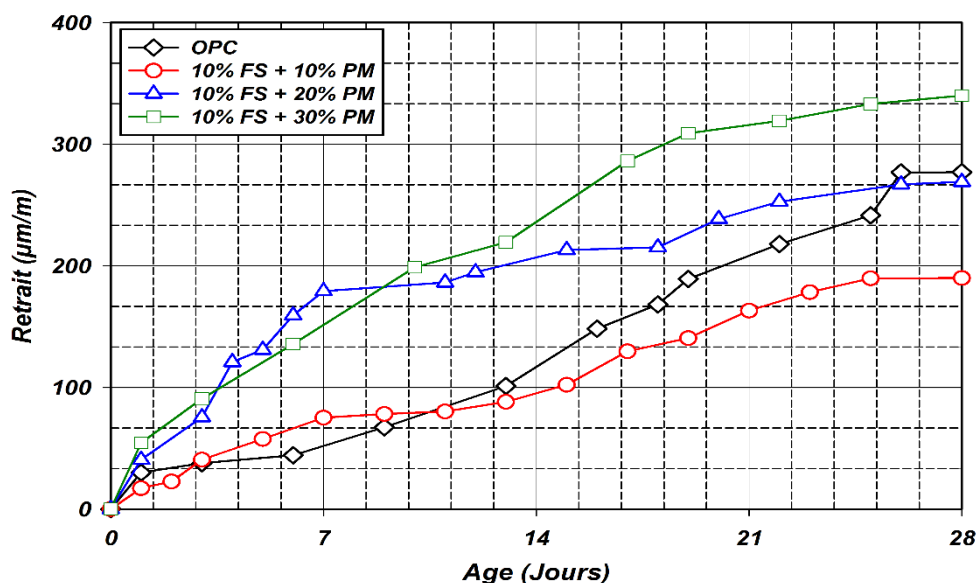


Figure 4.52. Variation du retrait des mortiers ternaire base de 10% FS + X% PM.

A travers les mélanges ternaires avec la substitution (10% FS + 10% PM et 10% FS + 20% PM), ces mélanges donnent les meilleurs résultats du retrait globalement à 28 jours. Par contre on remarque toujours des valeurs supérieures à celle de référence pour le mortier avec 10% FS + 30% PM.

4.5.2.3.3 Effet du couple 15% fumée de silice sur le retrait des mortiers ternaires

La figure 4.53 présente la variation du retrait en fonction d'âge (28 jours) pour les mortiers à base de 15% de la fumée de silice et 10, 20 et 30% de la poudre de marbre.

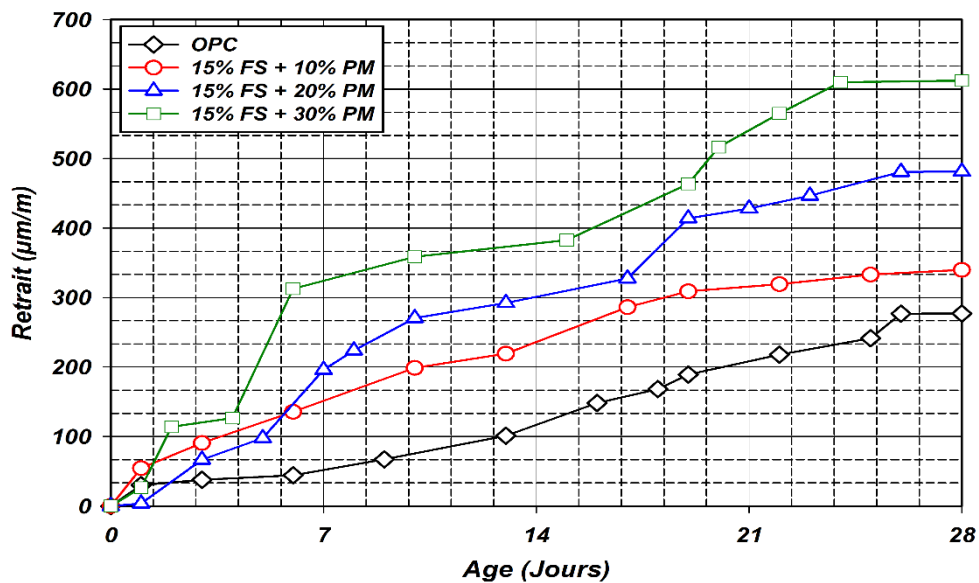


Figure 4.53. Variation du retrait des mortiers ternaire base de 15% FS + X% PM.

Pour ce système de substitution avec 15% de la fumée de silice et 10, 20 et 30% de la poudre de marbre affecte négativement le retrait par une augmentation progressive en fonction d'âge. Ceci résulte d'une substitution excessive du ciment par additions qui sont elle-même provoque un retrait excessive dans les mortiers binaires.

4.5.2.4 **Effet de la fumée de silice avec fibre sur le retrait**

La figure 4.54 présente la variation du retrait en fonction d'âge (28 jours) pour les mortiers à base de la fumée de silice renforcé par les fibres synthétique.

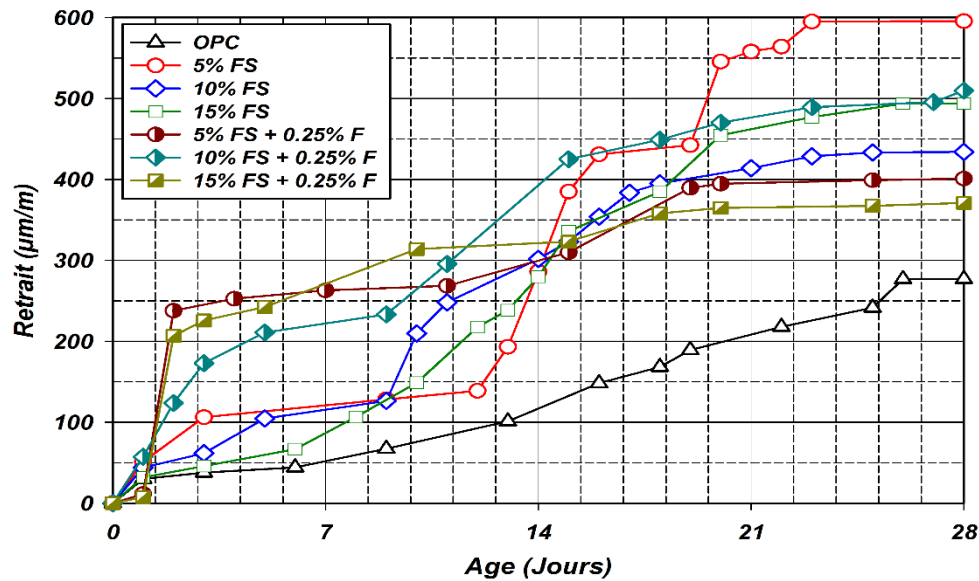


Figure 4.54. montre la variation du retrait des mortiers binaire base à la fumée de silice avec fibre en fonction de l'âge.

Par ailleurs, et afin d'améliorer les performances mécaniques des MAP l'incorporation de fibres est souvent une solution qui donne des résultats probants. Le mortier de fibres trouve de plus en plus un emploi en pratique, notamment dans la réparation des ouvrages dégradés.

Les fibres ont pour rôle essentiel de contrôler le mécanisme de la fissuration. A cet effet nous avons procédé à l'étude de la variation dimensionnelle (retrait) des MAP destiné à la réparation.

Les résultats précédents montrent nettement que l'introduction du fumé de silice en substitution de ciment avec des pourcentages de 5%, 10% et 15 % a affecté négativement la variation dimensionnelle (retrait) dans le temps qui accroît avec l'augmentation du taux de substitution du 1^{er} jour au 28 jours.

Nommions l'ajout des fibres à cette combinaison a augmenté le retrait aux 10 premiers jours, tandis que à 28 jours l'ajout des fibres a un effet bénéfique ou nous avons constaté une diminution importante du retrait clairement visualisé sur la figure 4.54.

- **Nous concluons par les résultats des essais de retrait réalisés sur le mortier autoplaçant binaire et ternaire. La nature et le taux des additions influent sur le retrait et la finesse des additions minérales est due essentiellement à la présence d'une porosité capillaire élevée, et l'ajout de fibres diminue le retrait.**

4.5.3 Absorption d'eau par capillarité

Les différents valeurs des coefficients de capillarité pour les mortiers utilisées est donnée par le tableau 4.14.

Tableau 4-14. Les valeurs des coefficients d'absorption pour les mortiers binaires et ternaires.

Les coefficients d'absorption [$\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$]				
Poudre de marbre	Fumée de silice			
	0	5	10	15
0	1,427	1,493	2,503	2,745
10	1.251	2.042	2.239	2.964
20	1,647	1.581	1.976	1.383
30	2,174	2.964	4.875	3.359
0.25% Fibres	--	4.348	3.960	4.282

On remarque que le coefficient d'absorption le plus élevé est celui du mortier avec 10% FS+30% PM et le plus faible celui du mortier à base 10% de poudre de marbre. L'absorption élevée du mortier à base de fumée de silice + les fibres synthétique est aussi remarquer et cela est probablement dû à la nature des fibres utilisée.

On constate que les mortiers binaires à base de 5% de fumée de silice ou bien 10 et 20% de la poudre de marbre donnent des coefficients comparables à celle de référence.

On remarque aussi que l'augmentation de taux de substitution ave la poudre de marbre favorise l'absorption capillaire est cela semble être à cause de leur granulométrie et leur nature de ces fillers et le leur surface spécifique inférieur à celle de la fumée de silice.

Conclusion générale

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux dont les qualités méritent d'être valorisées. En raison de leurs propriétés rhéologiques très spécifiques, leur compréhension nécessite des investigations plus approfondies

La confection de bétons autoplaçants (BAP) nécessite un grand volume d'addition minérale de manière à augmenter le volume de pâte permettant ainsi d'atteindre la fluidité qui fait la spécificité de cette nouvelle génération de bétons. Pour des raisons à la fois environnementale, mécanique et économique il est indispensable de substituer une partie de ciment par des ajouts minéraux.

Les propriétés du béton autoplaçants proviennent nécessairement de celles de la pâte. Pour cela les études de formulations se basent essentiellement sur le mortier et ses constituants dans ce travail nous allons présenter les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques du mortier autoplaçant, effectuées à l'aide de différents essais, ce qui devait nous permettre de comprendre le comportement des mortiers autoplaçants à l'état frais et durci.

L'ensemble des résultats obtenus dans cette étude révélant que :

➤ **L'état frais**

Après les différents essais réalisés, nous avons constaté ce qui suit :

1. L'incorporation de la poudre de marbre avec un taux variant entre (10 à 30%) influe positivement sur les propriétés rhéologiques diminution de seuil de cisaillement et la viscosité, Ainsi se explique que l'ouvrabilité élève mesuré à l'aide de l'essai d'étalement, cette dernière présente des valeurs qui varient entre 29 et 32.5 cm. Notons que le dosage en superplastifiant reste constant à 0.8% du poids de ciment pour tous les mortiers.
2. L'incorporation de la fumée de silice seule dans le ciment avec un taux varie entre (5 à 15%) affecte négativement la propriété rhéologique augmentée de seuil de cisaillement et la viscosité. Ces mortiers présents des valeurs d'étalement qui varie entre 24.8 à 21.45 cm.

3. L'augmentation du dosage en super plastifiant de 1 à 1.2% conduit à une augmentation de la déformabilité aussi bien que amélioration de comportement de rhéologique du mortier autoplaçant binaire.
4. La fumée de silice et la poudre de marbre améliore le comportement rhéologique des mélanges ternaires pour des teneurs de 15 à 45%. Dont le seuil de cisaillement et la viscosité sont réduits.
5. Pour le mortier autoplaçant base à a 5% FS +10, 20 et 30% PM, se caractérisé généralement par une ouvrabilité élevé. Par conséquent il résulte une diminution légère des propriétés rhéologique.
6. La substitution du ciment par la fumée de silice à 10% et poudre de marbre à 10% et 20% affecté négativement sur la l'ouvrabilité et comportement rhéologique des mortiers autoplaçant à l'exception de mortier avec 10% de fumée de silice + 30% poudre de marbre montre la fluidité plus que les autres.
7. Le mortier autoplaçant base à 15% FS + (10, 20 et 30% PM), nous a donné des propriétés rhéologiques idéales par rapport au mortier de référence.

– *A l'état durci*

• *La résistance à la compression*

1. L'augmentation des teneurs en fumée de silice provoque l'augmentation de la résistance à la compression des mortiers autoplaçant.
2. La résistance à la compression des mortiers binaires à base de la poudre de marbre à jeune âge augmente mais à long terme diminue.
3. La résistance à la compression pour les mortiers ternaire est réduite est cela est dû au taux de substitution élevé assuré par ce système. Mais à 28 jours semble ce système plus efficace.

• *Retrait*

Les résultats des essais de retrait réalisent sur le mortier autoplaçant binaire et ternaire montre que la fumée de silice et la poudre de marbre favorise la variation dimensionnelle de ce mortiers et cela est dû à la nature, la finesse des additions minérales et le taux des additions qui influent sur le retrait.

Pour le système ternaire le retrait a diminué d'une manière remarquable par rapport à celle de système binaire. L'utilisation des fibres a diminué le retrait pour les mortiers à base des ciments binaire par rapport aux mortiers sans fibres.

Pour l'absorption capillaire les mortiers binaires à base de 5% de fumée de silice et 10 , 20% de la poudre de marbre donnent des coefficients comparables à celle de référence.

Recommandations

Etant donné que ce travail a été réalisé dans une durée très limitée, l'étude de l'effet de la poudre de marbre et fumée de silice sur les propriétés des mortier autoplaçants de haut performance à l'état frais et durci a été aussi limitée à quelques paramètres. Pour cela, nous proposons aux futurs de mener un travail sur l'effet de la poudre de marbre et fumée de silice sur les propriétés des MAP a l'état frais et durci telles que :

1. La résistance à la compression à 56 et 90 jours ;
2. Le module d'élasticité ;
3. L'essai d'arrachement ;
4. Perméabilité ;

Comme on a vu, le remplacement de la fumée de silice par métakaolin. Par ce qu'il a une substance locale trouvée en Algérie et similaire la fumée de silice.

Pour cela, nous suggérons aux futurs étudiants d'ajouter métakaolin (mélange ternaire) et d'étudier leurs effets combines sur les propriétés du mortier autoplaçants de haute performance à l'état frais et a l'état durci.

Références bibliographiques

- [1] Okamura H., Ouchi M., “Self-Compacting Concrete. Development, present use and future”, Proceedings of the First International RILEM Symposium on S-Compacting Concrete, Stockholm, Suède pp. 3-14, 1999.
- [2] SEDRAN T., “ Les Bétons Autonivelants”, bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.
- [3] BARON J. et OLLIVIER J.P “Les Bétons – Bases et données pour leur formulation” Editions Eyrolles, 1996.
- [4] Y.MALIER “Les bétons à hautes performances, caractérisation,durabilité,application” 1991
- [5] Association Française de Génie Civil Bétons autoplaçants – “ Recommandations provisoires ”Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.
- [6] M. Venuat – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers ” - édition2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.
- [7] R. CHAID, R. JAUBERTHIE et A. BOUKHALED. “ Effet de l’ajout calcaire sur la durabilité des bétons”. Le banese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010
- [8] DADA EL-Hadja et LAMRI Nacira“ Etude rhéologique des mortiers autoplaçants à base des ajouts cimentaires quaternaires”. (Mémoire de MASTER) 2014/2015
- [9] A. K. Ramezani pour, “Engineering properties and morphology of pouzzolanic cement concrete ”, PhD Thesis, University of Leeds, 310 pages-April 1987.
- [10] R. CHAID. “ Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux”. Thèse de doctorat d’état en génie civil ENP décembre 2006
- [11] P. Claude AITCIN, “ Liant hydraulique, GCI 710 ” Université de Sherbrooke Canada.
- [12] ACI, “Processes, Self-Compacting Concrete”, Advanced Concrete Technology III, 203.9/3, (2003).
- [13] RAMACHANDRAN, V.S. Concrete Admixtures Properties, Science, and Technology”, 2nd, Noyes, Publications, Parkridge, NJ; (1995).
- [14] P.L. Domone, J.Jing, “Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete ”, Proceedings of RILEM International Symposium on SCC, Stockholm, September 1999, RILEM Proceedins PRO 7, Paris pp109-120.

- [15] Khayat, K.H, “Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete ”, *ACI Materials Journal* 1999, 96(3): 346–53.
- [16] G. Dreux “Nouveau guide du béton ” Edition, Eyrolles- Paris- 1998, P 29-41
- [17] Assié S., Escadeillas G., Marchese G. and Waller V. “Durability properties of low-resistance self-compacting concrete ’ ’ *Magazine of Concrete Research*, 2006, vol 58, pp. 1–7.
- [18] Nassif H.H., Najm H. and Suksawang N. “Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC ’ ’ *Cement & Concrete Composites*, 2005, vol 27, pp. 661–670.
- [19] Persson B. “A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete ’ ’ *Cement and Concrete Research*, 2001, vol 31, p. 193-198.
- [20] Felekoglu B., Turkel S. and Baradan B. “ Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete ’ ’ *Building and Environment*, 2007, vol 42, pp. 1795–1802.
- [21] CSTC Une Edition du Centre Scientifique et Technique de la Construction réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil) Septembre 2007 (corr. janv200 8).
- [22] Kheira Belaid, “performances de divers types d’agents viscosants dans les béton autoplacents pour bâtiments” , Université de Sherbrooke, (2009).
- [23] Courrazé G., Grossiord JL, “ Initiation à la rhéologie”, Tec& Doc, (2000).
- [24] Tahar Ali-Boucetta, “contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d’écoulement et de durabilité des bétons autoplacants et de hautes performances”, Université Badji Mokhtar-Annaba,(2011).
- [25] 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).
- [26] 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).
- [27] H. Nicolas, “Rhéologie des pates granulaires” Paris 6- Pierre et marie curie, france”, (2006).
- [28] PAPO A, “ Rhéological models for cement pastes ”, *Materials and Structures/ Matériaux et Constructions*, Vol. 21, pp 41 – 46, (1998).

- [29] Cyr M, “Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires”, Thèse INSA Toulouse , (1999).
- [30] FERRARIS, C. F. (1999). “Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete” : State of the Art Report, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol.104, n° 5, p.461-478.
- [31] Hu C., de Larrard F., “The rheology of fresh high performance concrete”, Cement and concrete research, vol. 26, 1996, pp. 283-294.
- [32] RILEM. (2001). “ Self-Compacting Concrete, State-of-the-art report of RILEM Technical Committee” 174-SCC, Edited by Skarendahl, A. et Petersson, O., RILEM Publications, France.
- [33] Hu C, “Rhéologie des bétons fluides”, Thèse de doctorat de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France OA16, 203 p, (1995).
- [34] DE LARRARD, F., FERRARIS, C.F. et SEDRAN, S. (1998). “Fresh concrete: a Herschel-Buckley material, Materials and Structures”, vol.31, n° 211, p.494-498
- [35] BANFILL, P.F.G. (2003). “The rheology of fresh cement and concrete - a review, Proceedings of the 185 11th International Congress, Chemistry of Cement, Durban”, p.50-63.
- [36] MOURET, M. et CYR, M. (2003). “A discussion of the paper "The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete”, by Geiker M. R. et al., Cement and Concrete Research, vol.33, n° 11, p.1901-1903
- [37] WÜSTHOLZ, T, “ A model approach to describe the fresh properties of self compacting concrete (SCC) ”, Otto-Graf-Journal, vol.16, p.79-93, (2005).
- [38] Doustens et Laquerbe, “Exploitation rhéométrique du test d'ecrasement entre plateaux parallèles”, Journal de mécanique théorique appliquée, (1987).
- [39] Beaupré D, Mindess S, “Rheology of Fresh Concrete: Principles, Measurements, and Applications”, Materials Science of Concrete V, Ed. by J. Skalny and S. Mindess, Acers, (1998)
- [40] Asakura E, Yoshida H, Nakae H., “Influence of superplasticizer on fluidity of fresh cement paste with different clinker phase composition”, Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cements, New Delhi IV;, pp.570-576(1992).
- [41] A.Ouai and A.R.Bedj, “L’effet synergique des ajouts cimentaires sur le comportement rhéologique des mortiers fluides” Université Ammar Telidji Laghouat, (2014).

- [42] 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, 294 P,(2007).
- [43] Golaszewski JG, Szwabowski J, "Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars", Cement and concrete research, vol. 34, pp. 235-248,(2004).
- [44] A. S. E. Belaidi, "contribution a l'étude rhéologique et durabilité de béton autoplaçant apport des ajouts cimentaires ternaires et fillers locaux et industriels" Saad Dahleb de blida, Blida, (2013).
- [45] A. Boukhelkhal, "Rhéologie,caractéristique physico-mecanique et durabilié des bétons autoplaçants a base de la poudre de marbre, Université Ammar Telidji Laghouat, Laghouat, (2012)
- [46] Carlsward, J., Emborg, M., Utsi, S. et Oberg, P. (2003). Effect of constituents on the workability and rheology of selfcompacting concrete, Proceedings of the 3rd International Rilem conference on SCC, Reykjavik, Iceland, p.143-153.
- [47] Chen JJ, Fung WWS, Kwan AKH, "Effects of CSF on strength, rheology and cohesiveness of cement paste" ,Construction and Building Materials, vol 35, pp. 979–987,(2012).
- [48] GROTH P, " Fiber reinforced concrete - Fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders", PhD-thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Lulea University of Technology, (2000).
- [49] NFP 18-598, Octobre 1991: «Granulats - Détermination de la propreté des sables: Equivalent de sable». Indice de classement: P 18-597.
- [50] Chapdelaine F. « Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais » Mémoire de Master (M.Sc.), 1998 Université de Laval, 126 pages.
- [51] Felekoglu B., Turkel S. and Baradan B. « Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete » Building and Environment, 2007, vol 42, pp. 1795–1802.
- [52] 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.22594.
- [53] NF-EN 15-432 «Béton : Essai de retrait » AFNOR Paris 1981
- [54] NF-EN 18-406 «Béton : Essai de compression » AFNOR Paris 1981
- [55] NF-EN 10-502 "Béton : Essai de capillarité"AFNOR Paris 1989

[56] UYSAL M, SUMER M, “Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures”, *Construction and Building Materials*, 25: 4112-20, 2010.

[57] UYSAL M, YILMAZ K, “Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 33: 771-6, 2011.

[58] 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 Materials*, 27(1): 263-70, 2011.

[59] BONAVENTTI V, DONZA H, MENINDEZ G, CABRERA. O., IRASSAR E.F., “Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy”, *Cement and Concrete Research*, 33(6): 865–71, 2003.

[60] PERA J, HUSSON S, GUILHOT B, “Influence of finely ground limestone on cement hydration”, *Cement and Concrete Composites*, 21(2): 99–105, 1999.

[61] HEIKAL M, EL-DIDAMONY E, MORSY M. S, “Limestone-filled pozzolanic cement”, *Cement and Concrete Research*, 30(11): 1827–34, 2000.

[62] ZHU W, GIBBS J C, “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, vol.35, n° 8, p.1457-1462, 2005.

[63] VOGLIS N, KAKALI G, CHANIOTAKIS E, TSIVILIS S, « Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements », *Cement and Concrete Composites*, vol.27, n° 2, p.191-196, 2005.

ANNEXE A

1-Analyse par DRX de poudre de marbre

Les résultats de l'analyse DRX de la poudre de marbre, qui sont montrés sur la figure 1 indiquent que cette poudre est constituée principalement de calcite avec quelques traces de quartz et de dolomite.

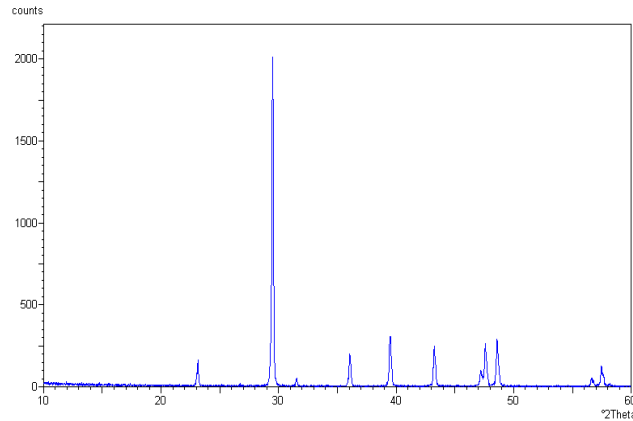
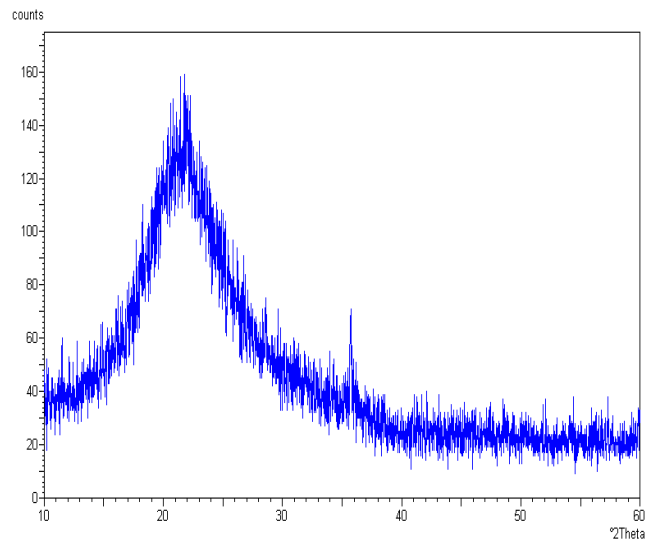


Fig. 1 DRX de poudre de marbre .

2-Analyse par DRX de fumée de silice



Le diffractogramme montre la présence d'un taux important de silice SiO_2 .

ANNEXE

ANNEXE B

Exemple de calcul de composition du mortier

B.1 Les Données

La masse volumique absolue des constituants :

- Ciment : $\rho_c=3010 \text{ kg/m}^3$;
- fumée de silice : $\rho_{FS}=2500 \text{ kg/m}^3$;
- Poudre de marbre : $\rho_{PM}=2860 \text{ kg/m}^3$;
- Sable : $\rho_s=2612 \text{ kg/m}^3$;
- Superplastifiant : $\rho_{sp}=1070 \text{ kg/m}^3$;
- Eau : $\rho_e=1000 \text{ kg/m}^3$;

Coefficient d'absorption du sable $Abs=0.76$

Le rapport Sable/mortier (S/M)=0.5

Le rapport E/Liant (E/L)=0.4 en poids Le superplastifiant (MEDAFLOW30) est de 30 extrait (contient 70% d'eau), le dosage en supe plastifiant sera de : $\%Sp=0.8\%$ du poids de liant.

B.2 Calcul d'humidité du sable

La teneur en eau de sable se calcule suivant la formule suivante :

$$\mu_s = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (1)$$

Où :

M_s : la masse sèche de sable en gramme ;

M_h : la masse humide de sable en gramme ;

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

$$\text{Correction} = \mu_s - Abs \quad (2)$$

B.3 Calcul des quantités de chaque constituant

B.3.1 Ciment

Le pourcentage en volume du ciment C% :

$$C_{\text{vol}} = \left(\frac{1 - \left(\frac{S}{M}\right)}{1 + \frac{E}{C \text{ par volume}}} \right) \quad (3)$$

La quantité de ciment C en kg :

ANNEXE

$$C \text{ (kg)} = \frac{(V \times (\frac{E}{c \text{ par volume}}))}{100} \times 100 \quad (4)$$

B.3.2 Sable

La quantité de sable S en kg est S :

$$S \text{ (kg)} = \left(1 + \frac{\text{correction}}{100}\right) \times \left(\frac{V \times S / M \times \rho S}{100}\right) \quad (5)$$

B.3.3 Superplastifiant

La quantité de superplastifiant est SP :

$$SP \text{ (kg)} = \frac{SP\% \times C}{100} \quad (6)$$

B.3.4 Eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E1, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E2 (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume :

$$\frac{\left(1 - \frac{S}{M}\right) \times 100 \times \frac{E}{C \text{ Par volume}}}{\left(1 + \frac{E}{C \text{ par volume}}\right)} \quad (7)$$

La quantité d'eau globale E en litre :

$$E_{\text{vol \%}} = \left(\frac{V \times E \text{ vol\%}}{100} \times \frac{\rho E}{1000}\right) - \left(\frac{SP \times 70}{100}\right) - \left(\frac{V \times \frac{S}{M} \times \rho}{100}\right) \quad (8)$$

$$\text{Eau } E_1 = E \times 0.70$$

$$\text{Eau } E_2 = E \times 0.30$$

Feuille Excel donnant composition et résultats des essais sur mortier

Essais sur Mortier

Entrer data dans cellules en rouge

Valeurs calculées dans cellules en noir

Référence du mélange

Essai N°

CEM I 42,5	Date 05/06/2016
0	% Fumée de Silice
0	% Poudre de marbre

volume de mortier (litres)

1000,00

sable/mortier vol

0,45

E/P par vol.

1,2112

poudre vol (%)

24,873

Eau volume (%)

30,127

composition Poudre(vol %)

type

Résultats

ciment portland

100

Etalement (cm)

Fumée de Silice

0

Poudre de Marbre

0

Temps d'écoulement (sec)

Superplastifiant MEDAFLOW 30

0,8

% (Sp/P)

Densité relative

3,03

teneur en eau du sable

	humidité (%ab)	absorption(%)	correction (%)
poids humide (gms)	200	0,00	0,76
poids sec (gms)	200		-0,76

Materiaux	Volume litres	Densité kg/m ³	Masse kg	Contenance d'eau		poids mélange	
				%	kg	kg	kg
poudre	248,734	3030	753,663			753,663	
Ciment	248,734	3030	753,663			753,663	
Fumée de Silice	0,000	2250	0,000			0,000	
Poudre de marbre	0,000	2860	0,000			0,000	
Eau	301,266	1000	301,3			306,14	W1 214,300
							W2 91,843
superplastifiant MEDAFLOW 30		1070	6,03	70	4,221	6,029	
Sable	450,000	2660	1197,000	-0,76	-9,097	1197,000	
Total	1000,000					2262,835	

E/P poids = **0,400**

2 Volume (l)		poids mélange	
		g	
poudre		1507,326	
Ciment	0,497	1507,33	
Fumée de silice		0,00	
poudre de marbre		0,00	
Eau	0,603	612,29	W1 428,6
	E theorique	602,53	W2 183,7
superplastifiant Glinium ACE 456		12,06	
Sable	0,9000	2394,0	
Total	2,0000	4525,7	
Fibres 0,5%		22,628	

ANNEXE C

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.

**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau**

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

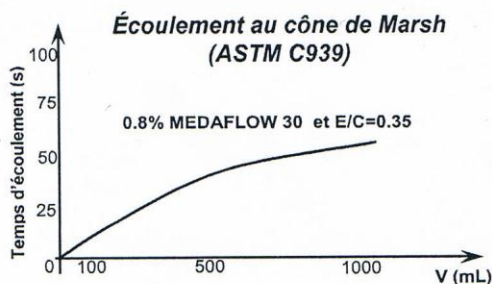
DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :
Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



MEDAFLOW 30

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitenaire 1100kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



SIKA S95 DM

Fumée de silice densifiée pneumatiquement pour bétons hautes performances et haute durabilité

Conforme à la norme NF P 18-502 et pr NF EN 13263-1

Construction

Présentation	La fumée de silice SIKA S95 DM est une silice ultra fine issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.
Domaines d'application	La fumée de silice SIKA S95 DM permet de fabriquer des : <ul style="list-style-type: none"> ■ BHP et BTHP ■ Bétons résistants aux milieux agressifs : <ul style="list-style-type: none"> - domaines agricoles : ensilage, stockage d'engrais, aires de stabulation, ... - milieu industriel : industriels chimiques et agro-alimentaires, sucreries, conserveries, laiteries, bacs de retentions, ... - stations services : béton en contact d'huiles et de carburants - aires de lavage - milieu marin : digue, aménagement portuaire, ... - zone de montagne : présence d'eau pure ou de sels de déverglaçage - stations d'épuration, égouts, caniveaux, ... ■ Bétons pompables ■ Bétons projetés
Caractères généraux	La fumée de silice SIKA S95 DM confère aux bétons les propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ■ améliore les performances mécaniques à longs termes : résistances en compression, flexion et traction ■ augmente le module d'élasticité ■ réduit le fluage ■ améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion ■ améliore la durabilité en milieux agressifs ■ diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction ■ diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides ■ facilite le pompage de tous les bétons mêmes peu dosés en ciment, ■ réduit les risques de ségrégations
Caractéristiques	
Coloris	Gris
Conditionnement	Big bag de 1010 kg
Stockage	Dans un local à l'abri de l'humidité
Conservation	Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans.



Données techniques	
Densité apparente	0,40 à 0,45
Densité réelle (hélium)	2,24
Teneur en SiO ₂	95% (≥ 92%)
Teneur en Na ₂ O éq	0,60% (≤ 1,0%)
Teneur en SiC	1,50% (≤ 3,0%)
Teneur en Cl libre	1,50% (≤ 3,0%)
Teneur en S total	0,10% (≤ 0,20%)
Surface spécifique BET (m ² /g)	23 (20 à 26)
Teneur en Oxydes (Fe,Al,Mg,Ca)	1,00% (≤ 1,50%)
Teneur en Cl ⁻	0,06% (≤ 0,20%)
Conditions d'applications	
Consommation/Dosage	Le dosage habituel est de 5 à 10 % du poids du ciment (pour tout autre dosage nous consulter).
Mise en œuvre	
	La fumée de silice SIKA S95 DM doit être introduite avec le ciment. Afin de tirer toutes les performances de la fumée de silice SIKA S95 DM, il est indispensable de défloculer complètement les micro-particules de silice. Pour cela, la fumée de silice SIKA S95 DM doit être systématiquement associée avec un superplastifiant/haut réducteur d'eau de type SIKA VISCOCRETE.
Précautions d'emploi	
	La fumée de silice SIKA S95 DM étant un produit pulvérulent, l'emploi d'un masque est préconisé lors de son utilisation.
Mentions légales	
	Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair.
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus
Alger/ ALGERIE

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84
213 (0) 21 50 16 92 à 95
Fax: 213 (0) 21 50 22 08
www.sikaeldjazair.com
Email: sika.commercial@dz.sika.com



Mise en œuvre

Le SIKACRETE® HD doit être mélangé à sec avec les autres constituants du béton avant introduction de l'eau de gâchage. Après ajout de l'eau, un malaxage long doit être respecté (au moins 1 min 30) pour permettre une répartition complète des différents constituants.

Dans le cas d'emploi d'une centrale de dosage, la totalité du SIKACRETE® HD sera introduit dans le camion malaxeur avec une partie de l'eau de gâchage; mélanger une minute puis ajouter les granulats, le ciment et le complément d'eau selon les modalités habituelles.

Malaxer jusqu'à l'obtention d'un matériau de consistance homogène.

Conseils d'utilisation

Les effets bénéfiques du SIKACRETE® HD sur la pérennité du béton durci ne sont possibles qu'à condition de respecter un dosage minimum en ciment de 350 kg/m³, avec une composition granululaire correcte et pour des valeurs faibles du rapport E/C (inférieures à 0,45)..

Réalisation de dallages

Le faible rapport eau/ciment des bétons traités avec le SIKACRETE® HD et l'absence de ressuage de tels bétons les rendent particulièrement sensibles à la dessiccation. Une cure soignée est indispensable surtout par temps chaud ou en présence de courants d'air.

On peut réaliser des bétons de consistance plastique, mis en place par vibration interne et tirés à la règle avant talochage. L'état de surface ainsi obtenu évite une finition mécanique toujours préjudiciable à la résistance à l'usure.

Pulvérisation immédiate sur la surface du béton d'un produit de cure : ANTISOL® BAN, ANTISOL® TP 45 (se reporter aux notices techniques des produits pour les dosages à utiliser).

En cas d'incorporation de grains durs type CHAPDUR® ou d'une finition par talochage mécanique, remplacer l'application du produit de cure par la mise en place d'un film plastique mince ou de paillasons humides afin d'assurer une préprise du béton sans risque de dessiccation. Cette phase nécessite de la part du chapiste un suivi attentif de l'évolution du béton. Après talochage, maintenir la protection du béton pendant au moins 48 heures ou utiliser un produit de cure.

Réalisation de bétons banchés

L'attention des utilisateurs est attirée sur le fait que l'ajout de SIKACRETE® HD dans un béton lui confère un effet «collant» (effet de thixotropie). On veillera à respecter une vibration soignée, sans prolonger la durée et tout en rapprochant les points de vibration.

Emplois spécifiques

Le béton pourra être additionné simultanément de SIKACRETE HD et de différents adjuvants. On utilisera :

- le SIKA® RETARDER ou le PLASTIRETARD® dans le cas de mise en place par temps chaud ou lors de transports de longue durée (nous consulter pour les dosages optimaux),
- le SIKA® AER 5 pour des bétons soumis au gel-dégel,
- un superplastifiant de la gamme SIKA® VISCOCRETE® pour les bétons à très faible rapport E/C.

Précautions d'emploi

Le SIKACRETE® HD étant un produit pulvérulent, l'emploi d'un masque est préconisé lors du déversement dans le malaxeur.

Consulter la fiche de données de sécurité.

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»

Sika El Djazair.
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus
Alger/ ALGERIE
www.sikaeldjazair.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84
213 (0) 21 50 16 92 à 95
Fax: 213 (0) 21 50 22 08
Email: sika.commercial@dz.sika.com



SIKACRETE® HD Durabilité

Additif à base de silice micronique pour bétons en milieux agressifs.

Présentation

Le SIKACRETE® HD est un additif qui permet de fabriquer des bétons à hautes performances ayant une durabilité exceptionnelle.

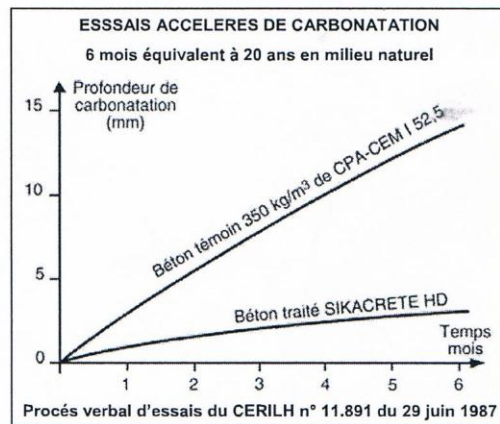
Domaines d'application

Bétons soumis aux environnements agressifs

A partir d'un liant standard du type CEM I 52,5, le SIKACRETE® HD apporte au béton une durabilité exceptionnelle vis-à-vis de nombreux milieux agressifs, sans faire appel à des liants spéciaux :

- domaine agricole : ensilage, stockage d'engrais, aires de stabulation,...
- milieu industriel : industries chimiques et agro-alimentaires, sucreries, conserveries, laiteries, bacs de rétention (nous consulter), ...
- stations services : huiles, carburants, aires de lavage,...
- bétons en présence d'eaux agressives: milieu marin, bétons de montagne soumis aux eaux pures (fonte des neiges) et aux sels de déverglaçage, fondations en présence d'eaux séléniteuses, stations d'épuration, égouts, caniveaux,...
- bétons soumis aux atmosphères agressives : zones industrielles et urbaines, à forte teneur en gaz carbonique.

Les essais montrent qu'un béton plastique dosé à 350 kg/m³ de CEM I 52,5 PM se carbonate 5 fois moins vite lorsqu'il est additionné de SIKACRETE HD.



Alcalis-réaction

Il est reconnu que l'apport de silice micronique diminue de façon notable les risques d'expansion du béton inhérents à l'alcali-réaction.

Le SIKACRETE® HD, par la forte réduction d'eau qu'il autorise et la fixation des alcalins du ciment, est à même de prévenir cette réaction en cas d'emploi de matériaux «à risques» dans la composition du béton.



Bétons à hautes performances

L'addition de SIKACRETE® HD permet d'accroître de 50 à plus de 100 % les résistances mécaniques en compression du béton. Les autres caractéristiques mécaniques (résistance en traction, module d'élasticité) sont elles aussi fortement augmentées. Le retrait à long terme et le fluage des bétons à hautes résistances sont plus faibles que ceux d'un béton classique.

Résistance en compression (MPa)

échéance	1 j	2 j	7 j	28 j	90 j
Béton témoin 350 kg/m ³ CPA-CEM I 52.5	9.5	17.3	30.5	38	47.2
témoin + 30 kg/m ³ SIKACRETE HD	23.2	38.3	53.2	65	72

Pour obtenir des bétons à très hautes performances, nous consulter.

Résistance à l'abrasion et l'érosion

Le SIKACRETE® HD permet de fabriquer avec des granulats durs (sable roulé, gravillons et graviers concassés), un rapport G/S élevé et un faible rapport E/C, des bétons résistants à l'érosion et à l'abrasion sans revêtement protecteur :

- canalisations, égouts, ...
- évacuateurs de crue de barrage
- bétons fortement sollicités (sols industriels, zones de manœuvre, entrepôts, quais, péages...)

Caractères généraux

Les bétons traités avec le SIKACRETE® HD peuvent résister aux agressions chimiques (engrais, sulfates, gaz carbonique, etc...) comme aux agressions physiques (gel-dégel) et mécaniques (érosion, abrasion, etc...).

Grâce à l'effet granulaire de la silice micronique et à la réduction d'eau importante qu'il autorise, le SIKACRETE® HD permet la réalisation de bétons très cohésifs à l'état frais, qualité mise à profit pour le coulage de bétons fluides sans ségrégation, pour le pompage ou la projection.

Par l'effet réducteur d'eau et grâce à la réactivité pouzzolanique de la silice micronique, le SIKACRETE® HD réduit la taille et le nombre des pores du béton durci.

On réalise des bétons de très faible perméabilité, pratiquement imperméables aux liquides et aux gaz. Il permet l'obtention de bétons à résistances mécaniques élevées.

Le SIKACRETE® HD contient les adjuvants nécessaires à une mise en œuvre facile du béton.

De ce fait, nous déconseillons l'emploi d'adjuvants complémentaires autres que ceux produits par notre société (se reporter aux conseils d'utilisation).

Caractéristiques**Coloris**

Gris

Conditionnement

Le SIKACRETE® HD est conditionné en sacs de 15 kg et livré sur palette houssée de 40 sacs.

Des conditionnements spécifiques peuvent être réalisés pour des emplois en quantité importante. Nous consulter.

Stockage

Stocker à l'abri de l'humidité.

Conservation

Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans..

Données techniques**Densité apparente**

0,5 environ

Nature

Poudre

Conditions d'application**Dosage**

Le SIKACRETE® HD s'utilise normalement à raison d'un à deux sacs de 15 kg par mètre cube de béton, quel que soit le dosage en ciment.

Les sacs doivent être utilisés en entier.