



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil

Option

Structures et Matériaux

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT 3^{ème} Cycle

**INFLUENCES DES AGENTS DE VISCOSITE SUR LES PARAMETRES
RHEOLOGIQUES INTRINSEQUES DES MORTIERS DES BÉTONS
AUTOPLAÇANTS**

Présenté par : Messaoudi farih

DEVANT LE JURY

BOUAFIA Youcef	Professeur	UMMTO	Président
KACI Salah	Professeur	UMMTO	Rapporteur
KACHI Mohand said	Professeur	UMMTO	Examineur
BENCHABANE Adel	Professeur	UMK. Biskra	Examineur
BENMOUNAH Abdelbaki	Professeur	UMB. Boumerdes	Examineur
HADDAD Ourdia	MC/ (B)	UMMTO	Invité

Année : 2016

Remerciements

Toute notre gratitude, grâce et remerciements vont en premier lieu à Dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer notre travail dans les meilleures conditions.

Ce travail de thèse a été effectué au sein du Laboratoire de modélisation expérimentale et numérique des matériaux et structures (LaMoMs) de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

*Je remercie particulièrement **Pr. Kaci Salah** et **M me O.Malek - Haddad** qui ont dirigé et accompagné ce travail, et au contact desquels j'ai beaucoup appris. Je souligne leur grande compétence, ainsi que leur disponibilité.*

Je tiens à remercier Professeur BOUAFIA Youcef, pour avoir présidé mon jury. Professeur KACHI Mohand said, Professeur BENCHABANE Adel et Professeur BENMOUNAH Abdelbaki, d'avoir accepté de rapporter ce mémoire de thèse.

Il m'est particulièrement agréable de remercier toutes les personnes (particulièrement les agents du laboratoire (LaMoMs) de l'université de Tizi-Ouzou) qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

En fin, j'adresse mes sentiments les plus respectueux à ma famille et mes amis qui m'ont toujours soutenu et aidé.

Résumé

Les bétons autoplaçants se distinguent par une fluidité extrême, permettant leur mise en place sans vibration. Les additions minérales et les adjuvants organiques sont deux composants indispensables pour la formulation des bétons autoplaçants ; ce sont les deux composants qui régissent le comportement rhéologique des bétons. Les additions minérales sont introduites dans les bétons pour améliorer leur comportement rhéologique à l'état frais, mais aussi pour participer aux propriétés mécaniques et de durabilité des bétons, notamment dans le cas où elles sont actives. Dans cette étude, deux séries d'essais ont été effectuées sur des pâtes autoplaçantes composées de ciment et d'ajouts ménagers, tels que les déchets de marbre, le laitier granulé et le verre à bouteille, comme addition minérale. La première série d'essais a été réalisée à l'aide des méthodes empiriques basées sur des essais d'ouvrabilité tels que le mini-cône et le cône de Marsh, la deuxième série consiste à déterminer les paramètres rhéologiques des mêmes pâtes à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité à l'aide du rhéomètre HAAKE RHEOSTRESS 1. Une corrélation entre les résultats obtenus sur les essais empiriques et ceux du rhéomètre sur les différents mélanges en considérant l'influence des superplastifiants et d'agent de viscosité) est proposée.

Mots clés : Bétons autoplaçants, mortier, agent de viscosité, paramètres rhéologiques

Abstract

Self-compacting concrete is characterized by high fluidity that enables placing without vibration. Mineral and organic additives are two essential components in the formulation of self-compacting concrete, which are the two components that govern the rheological behaviour of concrete. Mineral additives are introduced into the concrete to improve their rheological behaviour in the fresh state, but also to participate in the mechanical properties and durability of concrete, especially in cases where they are active. In this study, two series of tests were performed on the self-compacting pastes composed of cement and household additions, such as marble waste, granulated slag and the glass bottle as a mineral addition. The first series of tests was carried out using empirical methods based on workability tests such as the mini-cone and the Marsh cone, the second series is to determine the rheological parameters of the same pastes namely yield stress and plastic viscosity using rheometer Haake RheoStress 1. A correlation between the results obtained from empirical tests and those of the rheometer on the different mixtures by considering the influence of superplasticizers and viscosity agent) is proposed.

Keywords: Self-compacting concrete, mortar, viscosity agent, rheological parameters

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	4
CHAPITRE 1 : Concept des bétons autoplaçant.....	4
1. Introduction	4
2. Importance de l'utilisation des bétons autoplaçants dans la construction	4
3. Les exigences d'une formulation de B.A.P	5
4. Particularité structurale des BAP	6
4.1 Un volume de pâte élevé	6
4.2 Une quantité importante de fines.....	7
4.3 Un faible volume de gravillons	7
4.4 Dosage en superplastifiant	7
4.5 L'utilisation d'agent de viscosité dans des cas particulier.....	7
5. Constituants des BAP.....	7
5.1 Les granulats	7
5.2. Les additions minérales	8
5.2.1 Les fillers calcaires.....	8
5.2.2 Les cendres volantes.....	9
5.2.3 Le laitier de haut fourneau.....	10
5.2.4 Fumée de silice.....	10
5.3. Les superplastifiants	11
5.4. Les agents de viscosité	15
5.5. Le rapport Eau/Ciment	18
6. Classification des bétons autoplaçants	18
7. Méthodes de formulations	19
7.1. Méthode japonaise.....	19
7.2. Approche séudoise (CBI).....	21
7.3. Approche LCPC	21
8. Exemples de Formulation.....	22
9. Synthèse	23
CHAPITRE 2 : Caractérisation rhéologiques des bétons autoplaçant.....	24
1. Introduction.....	24
2. La rhéologie	24
3. Définition des grandeurs rhéologiques.....	25
3.1. Contrainte de cisaillement.....	25
3.2. Vitesse de cisaillement.....	25
3.3. Viscosité dynamique	26
3.4. Seuil de cisaillement.....	27
4. Comportement rhéologique.....	27
5. La thixotropie	29
6. Caractérisation des BAP à l'aide du rhéomètre	29
7. Caractérisation des BAP à l'état frais.....	30
7.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams	30
7.2 Essai J-Ring.....	31
7.3 Essai de l'écoulement à l'entonnoir (V-funnel)	32

7.4 Les autres essais	33
8. Correlation entre l'expérimental et les mesures des paramètres rhéologiques	37
9. Effet des constituants du béton	39
10. Synthèse	45
PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE	46
CHAPITRE 3 : Matériaux, mélanges et essais empiriques	47
1. Introduction	47
2. Matériaux utilisés	47
2.1. Ciment	47
2.2. Additions minérales	49
2.2.1. Poudre de marbre	49
2.2.2. Poudre de verre	51
2.2.3. Laitier granulé de haut fourneau	52
2.3. Superplastifiant	52
2.4. Agent de viscosité	53
3. Méthodes de préparation des pâtes de ciment	53
4. Consistance de la pâte de ciment : aspect visuel	53
5. Formulations étudiées	54
6. Résultats et Discussions	56
6.1. Résultats au mini cône	56
6.1.1. Influence du dosage en SP sur l'étalement au mini cône	57
6.1.2. Influence du dosage de PM sur l'étalement au mini cône	59
6.1.3. Influence du dosage de PV sur l'étalement au mini cône	60
6.1.4. Influence du dosage de LG sur l'étalement au mini cône	62
6.1.5. Influence du dosage de AV sur l'étalement au mini cône	64
6.2. Résultats au cône de Marsh	65
6.2.1. Influence du dosage en SP sur le temps d'écoulement au cône de Marsh	66
6.2.2. Influence du dosage de PM sur le temps d'écoulement au cône de Marsh	67
6.2.3. Influence du dosage de PV sur le temps d'écoulement au cône de Marsh	69
6.2.4. Influence du dosage de LG sur le temps d'écoulement au cône de Marsh	70
6.2.5. Influence du dosage de AV sur le temps d'écoulement au cône de Marsh	72
7. Synthèse	74
CHAPITRE 4 : Essais au rhéomètres	76
1. Introduction	76
2. Rhéomètre utilisés	76
3. Méthodes de préparation des pâtes de ciment	77
4. Formulations étudiées	77
5. Résultats et discussions	77
5.1. Influence du dosage en SP sur le seuil de cisaillement	78
5.2. Influence du dosage en SP sur la viscosité plastique	81
5.3. Influence du dosage en AV sur le seuil de cisaillement	84
5.4. Influence du dosage en AV sur la viscosité plastique	86
6. Relation entre essais empiriques et mesures rhéologiques	88
6.1. Relation entre étalement au mini-cône et seuil de cisaillement	88
6.1.1. Corrélation entre l'étalement et le seuil des résultats des groupes (sans AV)	88
6.1.2. Corrélation entre l'étalement et le seuil des résultats des groupes (avec AV)	90
6.2. Relation entre le temps d'écoulement au cône de Marsh et viscosité	93
6.2.1. Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité des résultats des groupes (sans AV)	93
6.2.2. Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité des résultats des groupes (avec AV)	95
7. Synthèse	98

CONCLUSION GENERALE	99
Références bibliographiques	101

Liste des figures

1.1. Exemple d'un coulage d'une dalle en béton autoplaçant [2]	5
1.2. Comparaison entre une composition de BAP et d'un béton ordinaire [4].....	6
1.3. Diagramme de remplissage et risque de ségrégation [8].....	8
1.4. Effet du dosage en filler calcaire sur l'écoulement en fonction du rapport E/C du mortier [17].....	9
1.5. Défloculation des grains de ciment par l'adjuvant organique [26]	11
1.6. Influence des dosages et type de superplastifiants sur les paramètres rhéologiques de la pâte [29]	12
1.7. Schéma général de la molécule des polyélectrolytes [32].....	13
1.8. Représentation schématique des polymères PMS et PNS [33]	14
1.9. Schéma général des phosphonates et des di-phosphonates [32].....	14
1.10. Variation du seuil de cisaillement et viscosité plastique en fonction d'agent de viscosité [35]	16
1.11. Variation de l'étalement en fonction d'agent de viscosité et le rapport E/L [35].....	16
1.12. Evolution du paramètres rhéologiques d'un mortier en fonction du type et du dosage en AV [11].....	17
1.13. Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant [36].....	17
1.14. Cône pour mesurer l'étalement des mortiers [43]	20
1.15. Entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers [43].....	20
2.1. Schéma de vitesse de cisaillement [32]	25
2.2. Schéma glissement des couches [32]	26
2.3. Lois de comportement rhéologique [48].....	27
2.4. Le corps thixotropique [52]	29
2.5. Rhéomètres développés pour les bétons [53].....	30
2.6. Schématisation de l'essai d'étalement au cône d'Abrams [3]	31
2.7. Essai de J-Ring [55].....	32
2.8. Schématisation de l'essai à l'entonnoir V-funnel [3]	32
2.9. Schématisation de la boîte en L [5]	34
2.10. Schématisation de l'essai du tube en U [55]	35
2.11. Schématisation de l'essai de caisson. [58]	35
2.12. Schématisation de l'essai de passoire [57]	36
2.13. Schématisation de l'essai de stabilité au tamis [3]	37
2.14. Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'étalement.	38
2.15. Corrélation entre la viscosité et le temps d'écoulement.....	39
2.16. Influence du volume de pâte sur le Seuil de cisaillement pour un rapport E/C constant [69]	41
2.17. Influence du volume de pâte sur la Viscosité plastique pour un rapport E/C constant [69]	41
2.18. Effet du laitier de haute fourneau sur les propriétés rhéologiques d'un mélange cimentaire [73]	42
2.19. Effet du cendre volante sur les propriétés rhéologiques d'un mélange cimentaire [73]	43
2.20. Diagrammes ternaire de seuil de cisaillement pour le système ciment portland-Laitier de haute fourneau- cendre volante pour les rapports E / masse solide (a) 0,39 et (b) 0,45. [75]	44
3.1. Diffractogramme du ciment anhydre	48
3.2. Distribution granulométrique du ciment anhydre.....	49
3.3. La poudre de marbre	51
3.4. La poudre de verre	52
3.5. Appréciation visuelle de la consistance d'une pâte	54
3.6. Essai d'étalement au mini-cône.....	57
3.7. Évolution de l'étalement en fonction de SP et de C/PM des pâtes des groupes 1, 2 et 3	58
3.8. Évolution de l'étalement en fonction de C/PM pour un SP fixé à 1 %	59

3.9. Évolution de l'étalement en fonction de C/pm pour un SP fixé à 1% et E/(C+pm) variable	59
3.10. Évolution de l'étalement en fonction de SP et de C/PV des pâtes des groupes 7, 8 et 9.....	61
3.11. Évolution de l'étalement en fonction de C/PV pour un SP fixé à 1%.....	61
3.12. Évolution de l'étalement en fonction de SP et de C/PV des pâtes des groupes 13, 14 et 15.....	63
3.13. Évolution de l'étalement en fonction de C/LG pour un SP fixé à 1% (cas ou E/(C+LG) = 0,4)	63
3.14. Évolution de l'étalement en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 4 et 5.....	64
3.15. Évolution de l'étalement en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 10 et 11.....	64
3.16. Évolution de l'étalement en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 16 et 17.....	65
3.17. Essai d'écoulement au cône de Marsh.	66
3.18. Évolution du temps d'écoulement en fonction de SP et de C/PM des pâtes des groupes 1, 2 et 3.....	67
3.19. Évolution du temps d'écoulement en fonction de C/PM pour un SP à 1%.....	68
3.20. Évolution du T(s) en fonction de C/PM pour un SP fixé à 0,6 % et E/(C+PM) variable.....	68
3.21. Évolution du T(s) en fonction de SP et C/PV des pâtes des groupes 7, 8 et 9	69
3.22. Évolution du temps d'écoulement en fonction de C/PV pour un SP fixé à 1%.....	70
3.23. Évolution du T(s) de SP et C/PV des pâtes des groupes 13,14 et 15.....	71
3.24. Effet du dosage en additions minérales sur la demande en SP des mélanges cimentaires	72
3.25. Évolution du T(s) en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 4 et 5.....	73
3.26. Évolution du T(s) en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 10 et 11.....	73
3.27. Évolution du T(s) en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 16 et 17.....	74
4.1. Rhéomètre HAAKE RHEOSTRESS 1	76
4.2. Exemple de rhéogramme obtenu avec le rhéomètre HAAKE RHEOSTRESS 1	78
4.3. Évolution du seuil de cisaillement en fonction du SP des pâtes des groupes 1, 2 et 3	79
4.4. Évolution du seuil de cisaillement en fonction du SP des pâtes des groupes 7, 8 et 9	80
4.5. Évolution du seuil de cisaillement en fonction du SP des pâtes des groupes 13, 14 et 15	80
4.6. Evolution de la viscosité plastique en fonction de SP pour les pâtes des groupes 1, 2 et 3.....	82
4.7. Evolution de la viscosité plastique en fonction de SP pour les pâtes des groupes 7, 8 et 9.....	83
4.8. Evolution de la viscosité plastique en fonction de SP pour les pâtes des groupes 13, 14 et 15.....	83
4.9. Evolution de la viscosité plastique en fonction de SP pour les pâtes des groupes 13, 14 et 15.....	84
4.10. Évolution du seuil de cisaillement en fonction du AV et du SP des pâtes des groupes 10, 11 et 12.....	85
4.11. Évolution du seuil de cisaillement en fonction du AV et du SP des pâtes des groupes 16, 17 et 18	85
4.12. Évolution de la viscosité en fonction du AV et du SP des pâtes des groupes 4, 5 et 6	86
4.13. Évolution de la viscosité en fonction du AV et du SP des pâtes des groupes 10, 11 et 12	87
4.14. Évolution de la viscosité en fonction du AV et du SP des pâtes des groupes 16, 17 et 18.....	87
4.15. Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 1, 2 et 3	89
4.16. Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 7, 8 et 9.....	89
4.17. Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 13, 14 et 15	90
4.18. Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 4, 5 et 6.....	91
4.19. Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 10, 11 et 12	92
4.20. Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 16, 17 et 18	92
4.21. Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 1, 2 et 3	93
4.22. Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 7, 8 et 9	94
4.23. Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 13, 14 et 15.....	95
4.24. Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 4, 5 et 6	96
4.25. Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 10, 11 et 12.....	97
4.26. Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 16, 17 et 18.....	97

Liste des tableaux

1.1. Classification des B.A.P. selon leur application [39]	18
1.2. Exemples de formulations AFGC 2000 [3]	22
1.3. Exemples de formulations japonaises [43]	22
1.4. Exemples de formulations françaises [44]	22
2.1. Modèles de comportement rhéologique des fluides [49]	28
2.2. Formules de la littérature permettant de relier l'étalement au seuil de cisaillement [2]	38
3.1. Composition chimique du ciment CEM II 42,5	48
3.2. Caractéristiques physiques du ciment CEM II 42,5	48
3.3. Composition minéralogique du ciment CEM II 42,5	48
3.4. Évolution de la résistance à la compression du ciment CEM II 42,5	49
3.5. Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.....	50
3.6. Composition chimique de la poudre de marbre.....	50
3.7. Composition minéralogique de la poudre de marbre	50
3.8. Composition chimique de la poudre de verre.....	51
3.9. Caractéristiques physiques de la poudre de verre.....	51
3.10 Composition chimique de laitier granulé.	52
3.11. Caractéristiques physiques de laitier granulé	52
3.12. Caractéristiques du MEDAPLAST SP 40.....	53
3.13. Procédure de malaxage des pâtes de ciment [89]	53

INTRODUCTION GENERALE

Le béton autoplaçant caractérisé par une grande fluidité, est un béton qui se met en place sans aucune vibration même dans des endroits très encombrés par le ferrailage et cela tout en préservant une bonne homogénéité jusqu'à sa durabilité. La grande maniabilité des BAP assure la fabrication d'ouvrages duquel la finition est toujours d'une bonne qualité. Cette fluidité peut être obtenue par l'utilisation de superplastifiant et l'agent de viscosité pour éviter la ségrégation.

Les bétons autoplaçants (BAP), développés depuis les années 80, sont encore à l'heure actuelle qualifiés de nouveaux bétons est bien qu'ils connaissent développement très appréciable.

Les bétons autoplaçants se différencient de béton ordinaire par l'utilisation de fortes quantité en additions minérales, de superplastifiant et éventuellement d'agent de viscosité. Ces bétons se distinguent également par leurs propriétés à l'état frais et leur mode de mise en œuvre.

Les bétons d'aujourd'hui sont souvent composés d'additions minérales. C'est dans cette optique, que s'inscrit notre sujet de recherche qui s'articule sur la conception et la caractérisation des bétons autoplaçants avec ajout, fabriqués à partir d'une gamme de constituants disponibles localement (contexte algérien). En fait, la thèse consiste en l'étude de la formulation de ce type de béton ainsi qu'une investigation sur l'exploitation d'un certain nombre d'ajout cimentaires. Cette présence a des effets sur le comportement des pâtes cimentaires et donc le comportement rhéologique du béton et toutes les propriétés afférentes.

Dans cette étude on s'intéresse au comportement des pâtes autoplaçantes (très fluides) qui rentrent dans la composition des bétons autoplaçants. Nous avons alors étudié l'influence du dosage des différents composants des pâtes, notamment le dosage de la poudre de marbre sur leur comportement rhéologique (étalement, seuil de cisaillement et viscosité plastique).

Cette poudre de marbre (addition minérale) est une poudre de récupération, issue des déchets d'une fabrique de produit de marbre, compte tenu de son abondance et de son prix à bon marché, cet ajout de poudre de marbre présente donc un intérêt économique certain.

L'étude réalisée comporte deux étapes. Pour la première, les propriétés d'écoulement au moyen du mini-cône et du cône de Marsh sont quantifiées pour déterminer la demande en

eau des additions en suspension dans l'eau et pour déterminer la demande en superplastifiant en présence de ciment, en fonction du dosage des additions. La deuxième campagne expérimentale s'appuie sur les résultats de la première étape pour caractériser l'écoulement de suspensions cimentaires complètes (ciment + addition + eau + superplastifiant + agent de viscosité) à travers les essais d'ouvrabilité déjà utilisés (mini-cône et cône de Marsh) et des mesures de paramètres rhéologiques (seuil statique et viscosités apparentes) à l'aide d'un rhéomètre (HAAKE RHEOSTRESS 1).

Une corrélation entre les résultats d'essais empiriques et les valeurs mesurées à l'aide du rhéomètre est étudiée.

Le travail que nous présentons est divisé en deux grandes parties : la première partie est bibliographique, alors que dans la deuxième partie nous discutons les résultats expérimentaux.

Le premier chapitre du mémoire est consacré aux connaissances actuelles des propriétés des BAP. Les méthodes de caractérisation des différentes propriétés de ces bétons sont présentées ainsi que le rôle des paramètres de composition permettant d'obtenir des matériaux extrêmement fluides et stables.

Le deuxième chapitre du mémoire est consacré aux conceptions de base de la rhéologie avec les définitions des paramètres rhéologiques et des types de comportement rhéologique, ainsi que l'influence des constituants du mélange sur la rhéologie du béton frais.

la rhéologie dans le cas des bétons s'est pendant longtemps limitée à des tests simples (étalement, affaissement, etc.). Mais depuis l'apparition des bétons fluides il est très important de faire des études plus profondes grâce à des rhéomètres.

La deuxième partie concerne particulièrement l'étude à l'échelle de la pâte de ciment. Son objectif est de comprendre l'influence des constituants fins susceptibles d'entrer dans la composition des BAP, et de mettre en évidence les interactions entre constituants.

Le troisième chapitre présente les matériaux, outils et méthodes utilisés pour la réalisation de cette étude.

Le quatrième chapitre traite de la mise en évidence de l'effet des additions sur l'écoulement des pâtes de béton. Une étude rhéologique au rhéomètre permet de souligner l'influence des additions minérales et permet de quantifier les paramètres rhéologiques et le comportement des pâtes.

La présente étude s'est déroulée au sein du Laboratoire de Modélisation expérimentale et numérique des Matériaux et structures en génie civil, Université mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie.

Première partie

**BÉTONS AUTOPLAÇANT :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

Chapitre 1

CONCEPT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

1. Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP) ont été développés pour la première fois au Japon dans les années 80 pour répondre aux exigences de la construction comme l'ouvrabilité et le manque de main d'œuvre, et afin d'assurer régulièrement une mise en place correcte avec un béton de qualité. Ces bétons se développent maintenant dans le monde entier dans de nombreuses applications et peuvent remplacer entièrement les bétons ordinaires dans le futur proche. Jusqu'à présent les BAP ont été formulés avec plusieurs matériaux de construction, normalisés ou avec des matériaux recyclés mais leur cahier de charges nécessite plus de prudence lors de leur formulation comparable au béton classique qui a une formulation plus simple et le changement de matériaux et des constituants nécessite plus d'expérimentation afin de prouver leurs validités.

2. L'importance de l'utilisation des bétons autoplaçants dans la construction

Le béton autoplaçant, BAP, est connu par sa fluidité très élevée et son homogénéité, qui lui permet de se mettre en place sous le seul effet de la gravité. Okamura et Ouchi sont les premiers qui ont contribué au développement de ce type de béton dont leurs premiers objectifs étaient d'assurer ces deux qualités d'ouvrabilités [1], après plusieurs chercheurs dans le reste du monde ont mené des travaux expérimentaux selon les exigences de leur pays et leur exigence de construction. Comparable au béton ordinaire les BAP révèlent plusieurs avantages à la fois techniques et socio-économiques :

- Construction d'éléments de structure qui ont des formes plus complexe.
- Améliorer la qualité des parements et la forme finale des surfaces.
- Coulage dans un milieu fortement ferraillés avec une capacité de remplir tous les coins.
- Facilité de mise en œuvre avec la possibilité de coulé dans un seul point et d'utilisation d'une pompe.
- L'élimination des effets sonores nuisibles due a la vibration.
- Réduction du temps de réalisation globale.
- Son utilisation au génie civil permet plus de Liberté de conception.

La figure 1.1 montre un coffrage ferraillé, dans ce cas il faut assurer que le béton présente une déformabilité et une résistance à la ségrégation maximale.



Figure 1.1. Exemple d'un coulage d'une dalle en béton autoplaçant [2]

3. Les exigences d'une formulation de B.A.P

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires par leur comportement à l'état frais.

- Un B.A.P. doit avoir un écoulement sous son poids propre, et pour assurer ça il doit avoir vitesse d'étalement importants.

- Assurer une bonne résistance à la ségrégation statique, pour les raisons d'homogénéité et propriétés mécaniques.
- 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 de l'élément [3].

4. Particularité structurale des BAP

Les constituants utilisés dans la formulation des bétons autoplaçants sont les mêmes pour les bétons ordinaires, mais différents en proportions et en nombre par deux éléments supplémentaires comme il est montré dans la figure 1.2 .

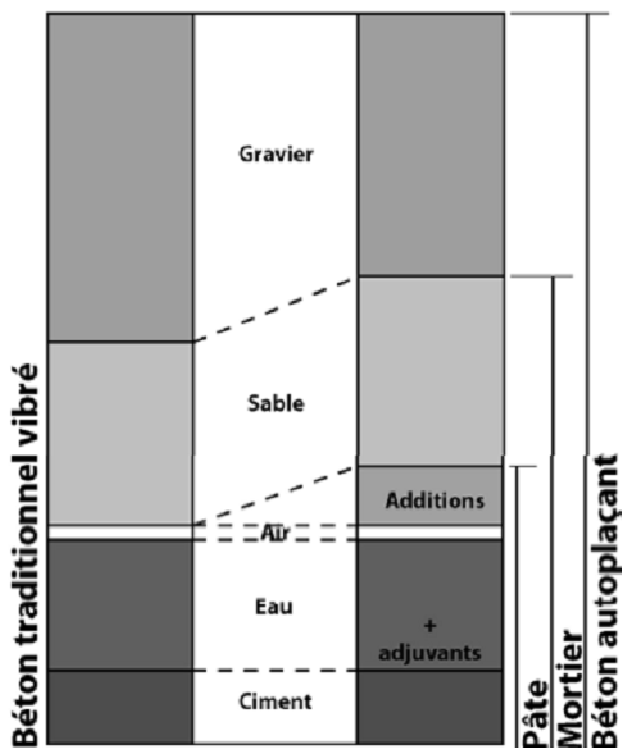


Figure 1.2. Comparaison entre une composition de BAP et d'un béton ordinaire [4]

4.1. Un volume de pâte élevé

Il faut maintenir un volume important de pâte pour limiter les frottements entre granulats. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les B.A.P. est donc élevé (330 à 400l/m³) [5].

4.2. Une quantité importante de fines

D'après AFGC [5] les BAP intègrent dans leurs formulations une certaine quantité de fines de l'ordre de 500 kg/m^3 , pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage.

4.3. Un faible volume de gravillons

Les gros granulats sont à l'origine des blocages du béton en zone confinée, c'est la raison pour laquelle leur volume est limité dans les BAP. Il ya deux facteurs à prendre en compte pour les B.A.P. Un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1 et le diamètre maximal des gravillons (D_{max}) dans un B.A.P. compris classiquement entre 10 et 20mm [5].

4.4. Dosage en superplastifiant

Les superplastifiants sont des réducteurs d'eau à haute efficacité. Leur mode d'action principal est d'augmenter la maniabilité des bétons [5]. Il est possible de les utiliser comme réducteurs d'eau afin de diminuer le rapport Eau/Liant.

4.5. L'utilisation d'agent de viscosité dans des cas particulier

Les agents de viscosité sont utilisés essentiellement pour améliorer la cohésion et la stabilité des mélanges de béton [5]. Notamment lorsque ce dernier est coulé sous l'eau.

5. Constituant du Béton Autoplaçant

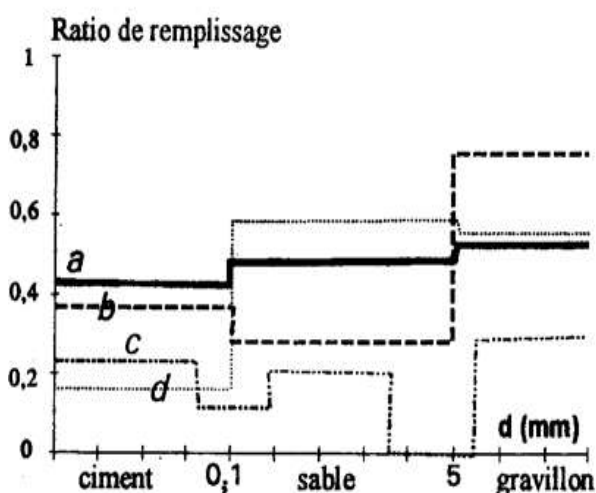
Chaque formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chaque constituant joue un rôle différent dans l'écoulement et surtout dans le comportement rhéologique du béton.

5.1. Les granulats

Certains auteurs [6, 7] montrent que la quantité de gros granulats a un grand influence sur la capacité du béton à passer au travers des armatures. Moins il y a de gros granulats, plus la capacité de remplissage est élevée. Généralement, les gravillons augmentent la compacité granulaire du squelette ce qui permet de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir les caractéristiques rhéologiques et mécaniques voulues [8] (Cité par [11]).

Il s'agit donc de trouver un arrangement lors de la formulation du matériau. Généralement concernant les BAP le diamètre maximal des granulats est limité à 20 mm cela pour éviter le problème de blocage [5].

Les travaux de Jin [9] affirment que la quantité de sable incluse dans le mortier doit être vérifiée. Leurs essais montrent que le rapport ($V_{\text{sable}}/V_{\text{mortier}}$) doit être supérieur à 50%. Selon AFGC [10] l'utilisation d'un rapport ($V_{\text{gravillons}}/V_{\text{sable}}$) (G/S) de l'ordre de 1. La répartition granulaire reste toujours importante. Il est donc nécessaire de maîtriser l'influence des différentes fractions granulaires les unes par rapport aux autres. D'après de Larrard [8] la distribution granulaire doit être bien équilibrée pour éviter les risques de ségrégation. La figure 1.3. Présente différents diagrammes de remplissage et les risques de ségrégation du mélange.



a : mélange stable

b : risque de ségrégation par un excès de gravillons

c : risque de ségrégation par un excès de fluidité et manque de continuité dans la courbe granulométrique

d : risque de ressuage par manque d'éléments fins

Figure 1.3 : Diagramme de remplissage et risque de ségrégation ([8] Cité par [11]).

5.2. Les additions minérales

Les additions minérales sont des produits qui ont des dimensions inférieures à 80 μm . Récupérer des déchets des centrales thermiques ou pulvérisation de certaines roches par broyage. pour l'amélioration de propriétés rhéologiques des BAP, l'addition des fines inertes ou réactives est nécessaire, ainsi que leurs présence peut remplacer une quantité de ciment dans la formulation et réduit la chaleur d'hydratation ce qui réduit le retrait endogène [12]

5.2.1. Filler calcaire

Le filler calcaire largement utilisé dans les bétons autoplaçant. Les résultats de Nehdi [13] montrent que la substitution de ciment par le filler calcaire conduit à la réduction du seuil de cisaillement et aussi l'augmentation de la viscosité plastique. les résultats de Yahia et al [14] affirment que l'ajout du filler calcaire pour un dosage constant en ciment diminue la viscosité d'une pâte de ciment et cela malgré l'augmentation de la concentration

volumique en solides. El hilali et al [15] rapportent que l'influence des fillers calcaires sur les propriétés des bétons autoplacants à l'état frais. Les compositions ont été réalisées avec une teneur en eau constant, le rapport eau/ciment constant, un rapport G/S=1 et un dosage en superplastifiant différent. La teneur en fines est constante avec trois types de fillers calcaires différents. Les résultats conduits sur les BAP montrent que l'ajout de fillers ayant une grande surface de Blaine améliore la fluidité du BAP. Les auteurs [16] ont étudié l'influence de différent type de filler calcaire. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisé n'a pas d'efficacité sur l'étalement et ce pour deux type de superplastifiants. En revanche, leur étude sur bétons montre que le type de filler a une forte influence sur la demande en superplastifiant pour obtenir un étalement donné. Les fillers à base de craie demandent plus d'adjuvant que les fillers calcaires, plus il y a de filler au lieu du ciment, moins il faut de superplastifiant pour atteindre un étalement donné.

Yahia et al [17] ont étudié l'influence du dosage en filler calcaire de surface spécifique de $480\text{m}^2/\text{kg}$ avec trois rapport différents de E/C (0,35 ; 0,40 et 0,45) sur l'étalement relatif et la vitesse relative d'écoulement d'un mortier, leurs résultats sont présentés sur la figure 1.4.

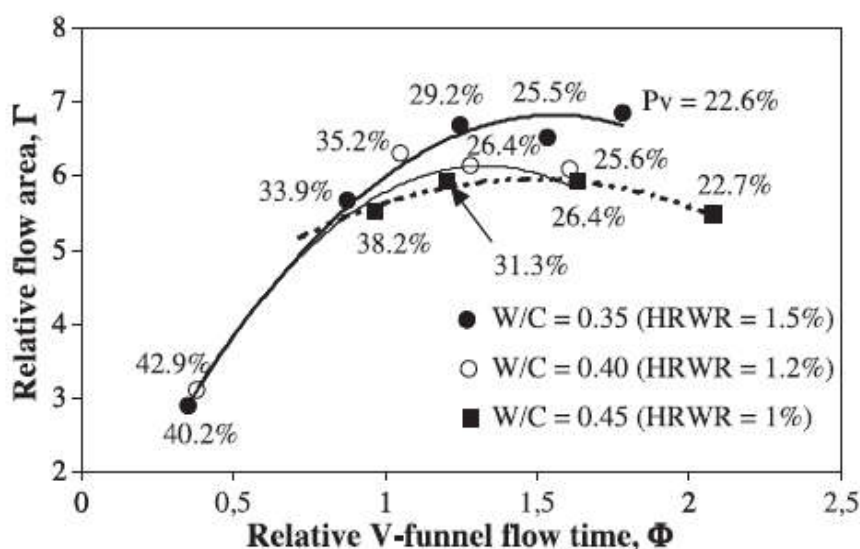


Figure 1.4. Effet du dosage en filler calcaire sur l'écoulement en fonction du rapport E/C du mortier [17]

5.2.2. Cendres volantes

Les cendres volantes sont des produits de grande finesse résultant de la combustion en centrale thermique, de minéraux solides. Les travaux de Park [18] affirment que le

remplacement d'une partie du ciment par des cendres volantes à un faible effet sur le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. Certains auteurs remarquent que leur utilisation peut améliorer la fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. Les auteurs [19] rapportent que le diamètre moyen des cendres volantes à une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines.

Les travaux de Lee et al [20] montrent que le remplacement d'une petite quantité de ciment par de la cendre volante résulte une bonne ouvrabilité et fluidité des mélanges.

5.2.3. Laitiers de hauts fourneaux

Le laitier de hauts fourneaux généralement broyé et ajouté en quantité variables au clinker, le laitier améliore les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires aussi augmenté les performances mécaniques et la durabilité du béton. Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet de diminuer le seuil et la viscosité des pâtes de ciment [18]. Les résultats de Shi et al [21] montrent que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant.

5.2.4. Fumées de silice

Les fumées de silice sont des poudres de silice extrêmement fines (inférieurs au $1\mu\text{m}$). Ce sont des sous-produits de fabrication du silicium et de ses alliages. Les propriétés des fumées de silice sont assez variées. La fumée de silice conforme à la norme (EN 13263), elles fournissent de très bonnes propriétés aussi bien au niveau de la rhéologie qu'au niveau des propriétés mécaniques et chimiques, tout en améliorant la durabilité du béton.

Les résultats de Flatt et al [22] montrent que l'activité pouzzolanique de la fumée de silice devient optimale à partir d'un certain dosage, la quantité au-delà de laquelle toute la chaux libérée par le ciment est consommée.

D'après les résultats de Gallias et al [23] pour un rapport eau/liant constant, l'augmentation de pourcentage de fumée de silice mène à augmenter l'ouvrabilité d'un béton.

Pour certains auteurs [18-21] la fumée de silice augmente les valeurs de seuil et de viscosité en augmentant la compacité des mélanges, alors que Carlswald [7] rapportent que les fumées de silices ne modifient pas la viscosité. Certains auteurs [19-24] montrent que l'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant soit pour des pâtes de ciment ou pour des bétons.

5.3. Les superplastifiants

Les fluidifiants interagissent avec les particules du ciment et celles des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation. La grande fluidité des bétons autoplacants est assurée par des dosages relativement importants en fluidifiants.

D'après Flatt et al [25] l'action d'un superplastifiant lorsqu'il est introduit dans un mélange suit 3 mécanismes :

- une partie est adsorbée,
- une partie est consommée par les réactions avec les hydrates,
- une partie, en excès, reste en solution.

Le mode d'action de superplastifiant peut-être décrit comme suit.

Lors du gâchage du béton, sous l'effet des forces attractives de l'eau, les particules de ciment forment des agglomérats piégeant une bonne partie d'eau libre à l'intérieur.

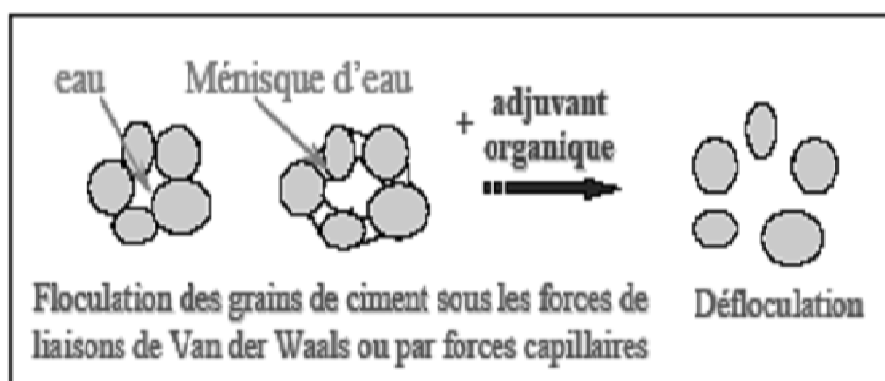


Figure.1.5. Défloculation des grains de ciment par l'adjuvant organique.[26]

Les superplastifiants permettent de réduire un volume important d'eau par l'hydratation du ciment. Généralement, les superplastifiants utilisés dans les formulations des BAP sont du type polyméline sulfoné, polycarboxylate ou de naphthalène sulfonate [27].

D'après les résultats de Hu [28] pour un dosage en eau constant l'augmentation du dosage de superplastifiant dans le béton frais mène à diminuer les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et la viscosité plastique).

Jianwei et al. [29] ont étudié les propriétés d'une pâte de ciment constitué d'un mélange de deux polymères. Les auteurs ont comparé les propriétés rhéologiques d'une pâte de ciment de $E/C = 0,30$ et $0,51$ adjuvanté par le (PCA) un fluidifiant de type polycarboxylate et un fluidifiant de type naphthalène sulfonate (PNS).

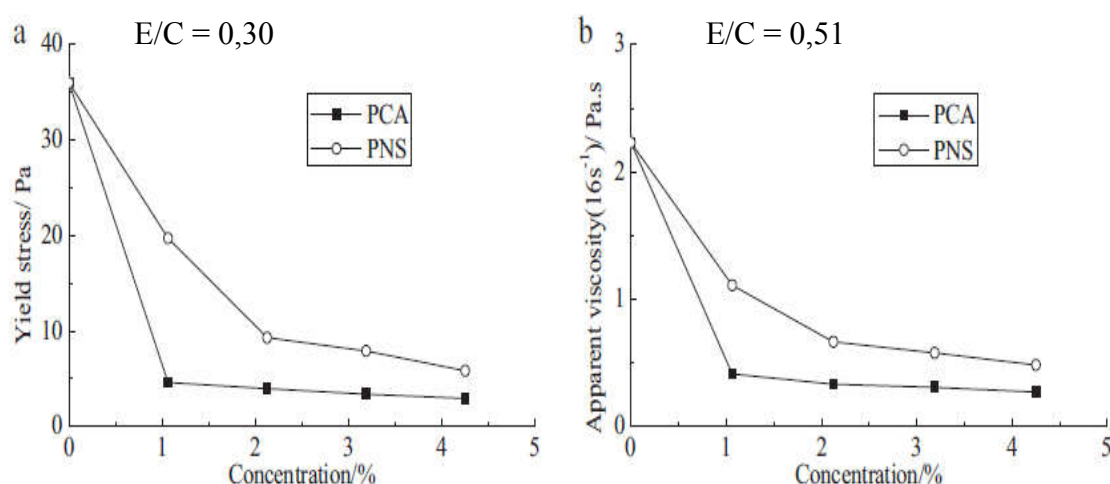


Figure 1.6. Influence des dosages et type de superplastifiants sur les paramètres rhéologiques de la pâte de ciment [29]

Le superplastifiant de type PCA est plus efficace pour diminuer le seuil de cisaillement et la viscosité apparente de la pâte que le PNS.

Certains auteurs Y.Miura et al. (cité par [30]) ont étudié les propriétés d'un mortier autoplacant avec un nouveau fluidifiant constitué d'un mélange de deux polymères. Les auteurs ont comparé les propriétés rhéologiques d'un mortier de rapport $E/C = 0,5$ adjuvanté par le FPC, un fluidifiant de type polycarboxylate PC et un fluidifiant de type naphthalène sulfonate NS.

Pour un étalement fixé à 240 mm, ils ont remarqué que le dosage en PC et en FPC est plus faible que celui d'un NS. Par ailleurs, la viscosité plastique est plus élevée avec le FPC. Y.Miura et al. (cité par [30]). D'après les travaux de Jolicoeur et al [27] les interactions ciment/superplastifiant peuvent être vues comme une réaction entre deux systèmes chimiques polyphasiques. En effet, les superplastifiants impliquent avec les interactions entre grains de ciment mais aussi avec le processus d'hydratation ils peuvent réagir avec le ciment par adsorption sur les charges négatives mais ils peuvent également réagir avec les hydrates.

Concernant le type de ciment, nous avons vu que différentes réactions chimiques peuvent se produire, une modification de la rhéologie est donc possible selon l'intensité de ces réactions et la teneur en ions de la solution. La présence de sulfates conduirait notamment à une plus grande perte de fluidité [25].

Sugamata et al [31] réalisé une étude sur l'influence de différents superplastifiants et de leurs dosages sur la rhéologie d'un mortier. Leurs travaux affirment qu'à partir d'une

certaine valeur l'augmentation du dosage d'un des superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier.

Type des adjuvants organiques

➤ Les lignosulfonates

Les premiers adjuvants organiques sont apparus en 1932 avec les lignosulfonates. Ceux sont des polyélectrolytes qui dispersent la suspension par effet purement électrostatique.

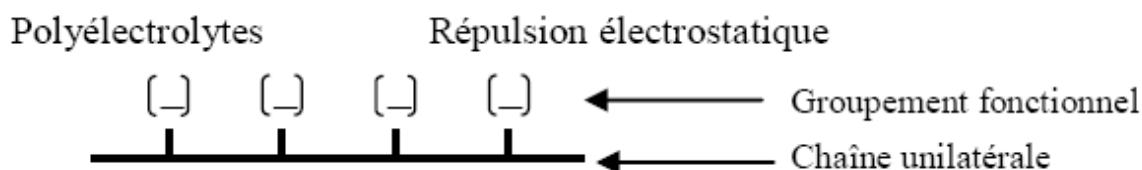


Figure 1.7. Schéma général de la molécule des polyélectrolytes [32]

Les lignosulfonates a été abandonné du fait d'un fort entraînement d'air qu'il introduit dans le béton, augmentant ainsi sa porosité. Pourtant, ces très grands entraîneurs d'air sont encore utilisés pour l'élaboration de bétons auto-plaçants en Norvège par Wallevik. En effet, les bulles d'air ont l'avantage de contribuer à la diminution du phénomène de ségrégation, aidant ainsi à la bonne ouvrabilité du béton et à la résistance gel-dégel.

➤ Les polynaphtalènes sulfonates (PNS) et polymélamines sulfonates (PMS)

Pendant plus de trente ans, l'industrie du béton s'est satisfaite de ces réducteurs d'eau jusqu'à ce que les Japonais et les Allemands mettent sur le marché des produits de synthèse aux propriétés dispersantes beaucoup plus efficaces que les lignosulfonates de l'époque. Ces nouveaux produits développés en 1940 sont les sels sulfoniques de condensé de formaldéhyde et de naphtalène (produit japonais) PNS ou de mélamine (produit allemand) PMS. Ils ont été commercialisés sous divers noms : superplastifiants, superréducteurs d'eau, fluidifiants, etc. Ce sont aussi des polyélectrolytes qui dispersent la suspension par effet purement électrostatique. Leur représentation schématique est la suivante :

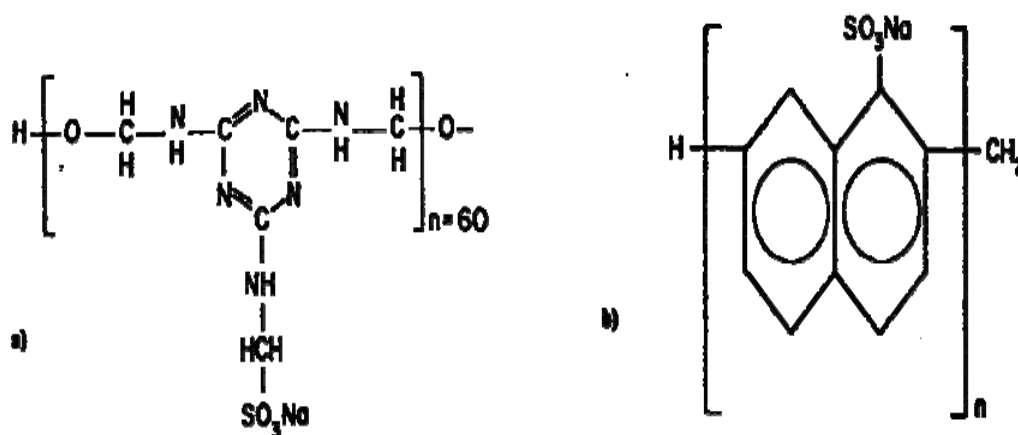


Figure 1.8. Représentation schématique des polymères :
 a) polycondensé de formaldéhyde et de mélamine sulfonate PMS
 b) polycondensé de formaldéhyde et de naphthalène sulfonate PNS [33].

H peut être remplacé aussi par un groupe alkyle.

Ce sont des polymères anioniques avec des groupes sulfonates SO_3^- à intervalles réguliers.

➤ Les phosphonates éthoxylés

En 1990, apparurent les Phosphonates Ethoxylés ou Di-Phosphonates Ethoxylés nommés aussi DPE et formés par une unique chaîne d'oxyde d'éthylène avec respectivement un groupement fonctionnel PO_3^-

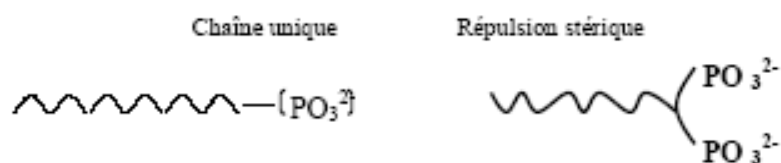


Figure 1.9. Schéma général des phosphonates (gauche) et des di-phosphonates (droite) [32].

Ce sont des polymères qui agissent en grande partie par répulsion stérique. Ils sont connus spécialement pour provoquer une répulsion stérique entre les particules de ciment, en réduisant leur agglomération et en permettant une maniabilité élevée du béton frais avant la prise.

5.4. Les agents de viscosité

Les agents de viscosité ce sont généralement des dérivés cellulotiques des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses qui interagissent avec l'eau et augmentent sa viscosité. Leur but est d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus visqueuse et en conservant une répartition homogène des différents constituants de béton.

une étude réaliser par (Yurugi et al. cité par Sandrine B [11]) sur un mortier avec différents dosages en agent colloïdal à base de glucose (dosage variant de 0 à 0,05% du volume de l'eau) et de superplastifiant (dosage variant de 1,2 à 3% de la masse de liant) a dit que le ressuage était nul quand la teneur en agent colloïdal dépasse 0,03% .

Les produits les plus utilisés pour la formulation des BAP sont :

- Les dérivés cellulotiques : "hydroxy propyl méthyle cellulose" (HPMC) ;
- "Hodroxyethyl cellulose" (HEC), "carboxy méthyle cellulose" (CMC) ;
- Les polymères issus de la biotechnologie, qui sont des polysaccharides obtenus par fermentation (gomme de Xanthane de welan, biopolymère,...).

D'après Khayat et al [34] les agents de viscosité peuvent être classés en trois catégories en fonction de leurs mécanismes d'action:

-**Adsorption** : La longue chaîne de polymère adhère à la périphérie des molécules d'eau. Cela à pour effet d'adsorber et de fixer une partie de l'eau d'ajout. Il y a augmentation de la viscosité de l'eau d'ajout et donc de la pâte de ciment.

- **Association** : Les molécules au contact de la chaîne de polymère développent des forces d'attraction. Le mouvement de l'eau est ainsi bloqué par la création d'un gel et sa viscosité est augmentée.

- **Entrelacement** : Pour un faible taux de cisaillement et particulièrement pour une forte concentration, la chaîne des polymères peut s'entrelacer et s'enchevêtrer ce qui augmente la viscosité apparente. L'enchevêtrement peut se délier lorsque la vitesse de cisaillement augmente. La chaîne de polymère s'oriente alors dans le sens de l'écoulement ce qui diminue la viscosité apparente.

Andreas Leemann et al. [35] ont étudié l'influence du dosage de l'agent de viscosité sur le mortier et béton. Les auteurs rapportent que les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et la viscosité plastique d'un mortier est augmenté significativement pour un rapport E/L compris entre 0,36 et 0,48 lorsque PS (agent de viscosité de type polysaccharide) est augmenté de 0,2% à 0,8%.

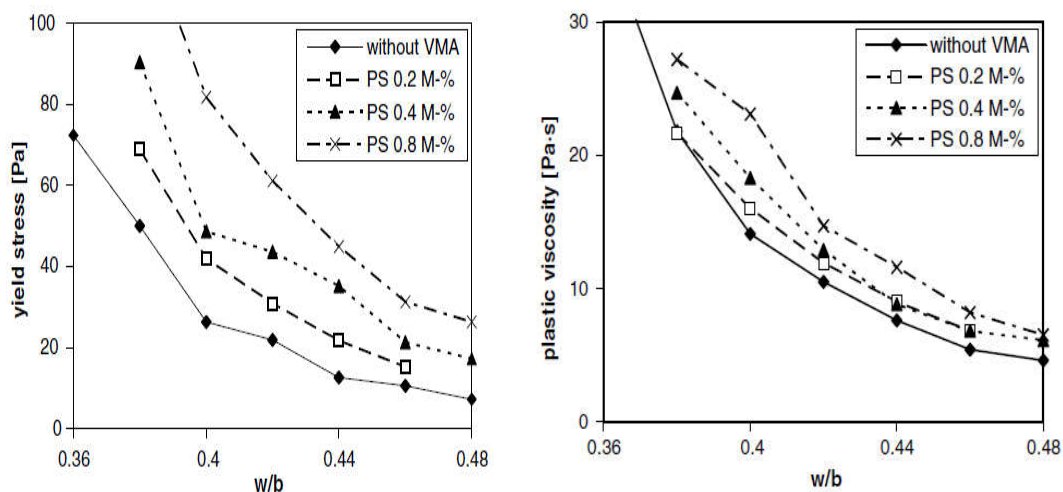


Figure 1.10 : gauche : variation du seuil de cisaillement en fonction d'agent de viscosité et le rapport E/L ; droite : variation du viscosité plastique en fonction d'agent de viscosité et le rapport E/L [35]

Les auteurs [35] ont montré que le diamètre d'étalement d'un mortier est diminué significativement pour un rapport E/L compris entre 0,36 et 0,48 lorsque PS (agent de viscosité de type polysaccharide) est augmenté de 0,2% à 0,8%.

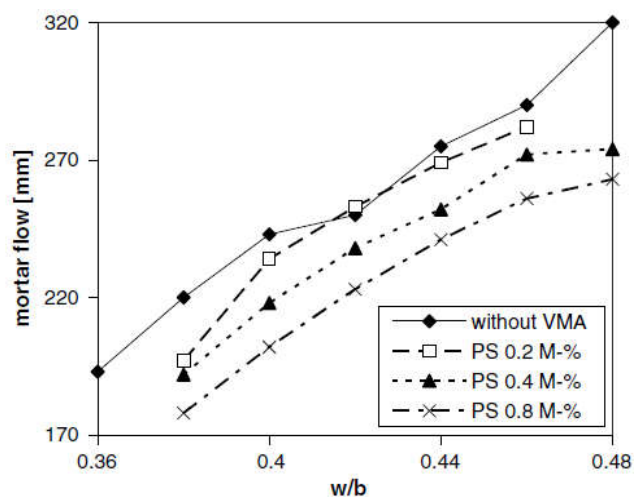


Figure 1.11 : Variation de l'étalement en fonction d'agent de viscosité et le rapport E/L [35]

Les résultats des auteurs [9,34] montrent que l'incorporation d'un agent de viscosité permet d'augmenter la valeur du seuil de cisaillement et la viscosité apparente quels que soient le rapport eau sur ciment, le type et la quantité de superplastifiant inclus dans la pâte cimentaire.

Il ya une corrélation entre le dosage en agent de viscosité et le dosage en superplastifiant ,des deux figures 1.13 (a) et (b) on remarque que la demande en superplastifiant augmente avec l'augmentation du dosage en agent viscosant.

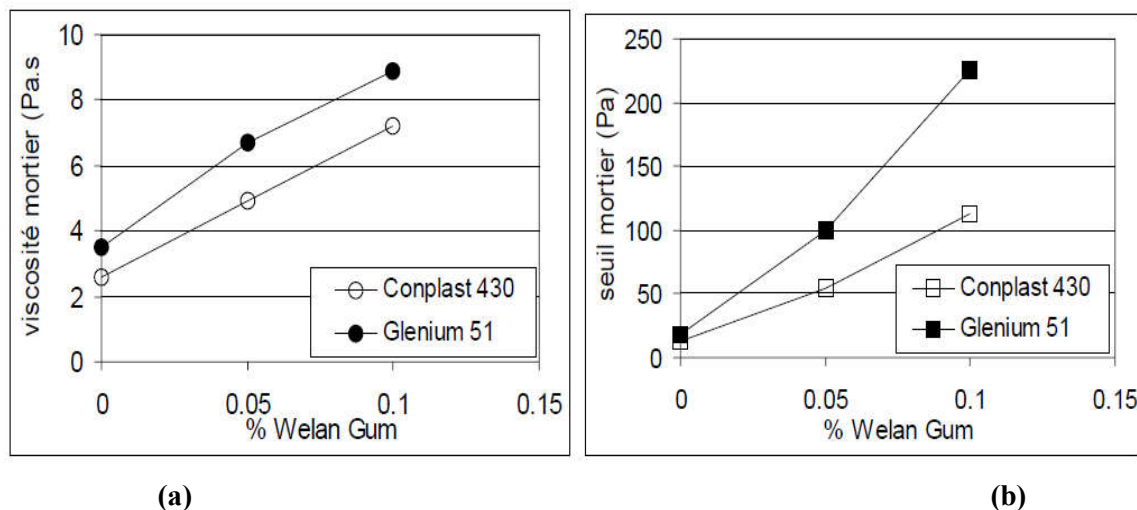


Figure 1.12 : Evolution du paramètres rhéologiques d'un mortier en fonction du type et du dosage en agent viscosant [11].

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, pour formuler un béton autoplaçant il faut sélectionner des quantité agent de viscosité , superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage.

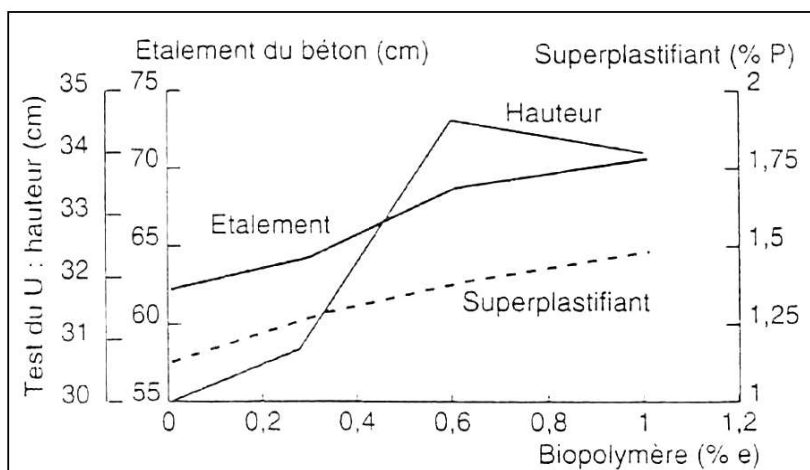


Figure 1.13: Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant [36]

Les agents de viscosité possèdent un rôle très important pour maintenir la stabilité des mélanges cimentaires. Ils assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements libres d'eau [36].

Selon Turcry et al [36], l'utilisation des agents de viscosité se justifie dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton.

5.5. Le rapport Eau/Ciment

Le rapport E/C a une grande influence sur le l'écoulement du matériau cimentaire, très relié aux différentes propriétés des bétons, aux états frais et durci. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité de béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ainsi au niveau des paramètres rhéologique notamment le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent. Domone et al [37] déclare que le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent avec l'augmentation du rapport E/C.

Les résultats trouvés par Utsi et al [38] montrent que l'introduction excessive d'eau provoque l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais et la diminution de la résistance mécanique du béton à l'état durci.

le dosage du ciment dans le béton est fréquemment relié aux propriétés mécaniques et de durabilité du béton.

6. Classification des bétons autoplaçant

La classification des bétons autoplaçant s'effectue selon leur intervalle d'écoulement (tenant compte de la géométrie du coffrage et de la disposition des armatures), Les bétons autoplaçants seront désormais classés selon trois catégories, suivant leur domaine d'application, le type d'application et l'épaisseur de la structure dans le cas d'une application horizontale [39].

Tableau 1.1 : classification des B.A.P. selon leur application [39] (Cité par [11]).

Intervalle d'écoulement (mm)	Application horizontale		Application verticale
	Epaisseur ≤ 300 mm	Epaisseur > 300 mm	
$I \geq 100$	1	2	2
$80 \leq I \leq 100$	2	2	3
$I < 80$	3	3	3

Les classes 2 et 3 contiennent deux sous-classes en fonction de la longueur maximale de cheminement horizontal du B.A.P. : 5m pour les classes 2a et 3a, 10 m pour les classes 2b et 3b.

Les chantiers, où la solution B.A.P. a été retenue, montrent l'intérêt de ces bétons. Les motivations de ce choix les plus couramment rencontrées sont la facilité de mise en oeuvre, la réduction des délais et la qualité des parements [40].

On peut citer quelques ouvrages réalisés en B.A.P [40]:

- Autoroute A75 déviation Clermont-l'Hérault (34).

- Les massifs d'éoliennes à Plougras (22), comportant une densité d'armature importante.
- Le barrage Belbezet (34), nécessitant une consolidation des parois rocheuses et l'obstruction de cavités.
- Usine de traitement de déchets industriels à Limay (78), nécessitant coffrages complexes ou de grande hauteur.

Dans les cas de résistances mécaniques les B.A.P. « bétons autoplaçant » ou B.H.P.

« Hautes Performances » peuvent être mises au point [41].

7. Méthodes de formulations

La formulation des bétons autoplaçants est plus élaborée que celle d'un béton ordinaire.

En effet, en plus des critères habituellement choisis pour la formulation des bétons ordinaire notamment (résistance mécanique, durabilité...) les bétons autoplaçants contiennent deux propriétés qui sont contradictoires : une bonne fluidité pour assurer une bonne mise en place ; et une bonne viscosité pour éviter les problèmes des ségrégations.

7.1. Méthode japonaise

La formulation japonaise a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura et al [42]. Cette méthode consiste premièrement à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite à procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton les meilleures performances.

Le principe de base de cette approche s'appuie sur les points suivants :

- La teneur des granulats est limitée à 50% de leurs compacités, réduisant ainsi le phénomène de blocage,
- Le volume du sable représente 40% du volume total de mortier,
- L'optimisation de la pâte, notamment, du rapport E/L (eau / liant) et du dosage en superplastifiant se fait d'une manière empirique sur mortier en effectuant des essais d'étalement au mini-cône et au V-funnel.

Les travaux de Okamura et al [42] montrent que il ya deux grandeurs élémentaires qui sont étalement relatif et vitesse relative. La fluidité du mortier est donnée par :

$$\Gamma_m = \left(\frac{h}{h + y} \right), \quad R_m = 10/t$$

Avec :

Γ_m : Étalement relatif,

R_m : Vitesse relative d'écoulement en (sec-1)

r_1 et r_2 : Diamètres d'étalement dans deux directions perpendiculaires en (mm),

t : Temps d'écoulement du mortier en (sec).

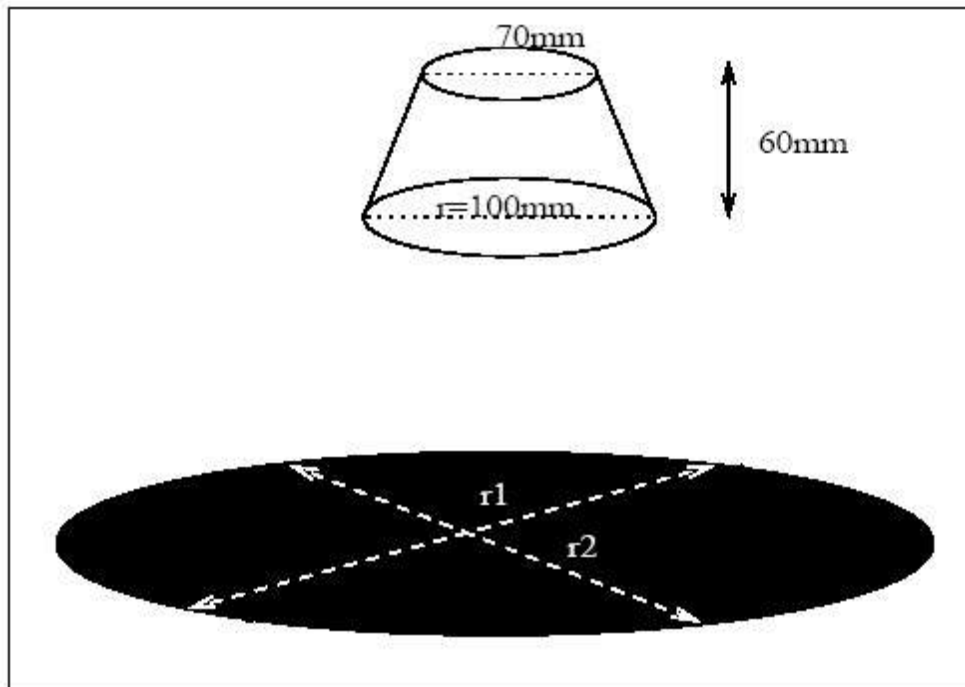


Figure 1.14 : Cône pour mesurer l'étalement des mortiers [43]

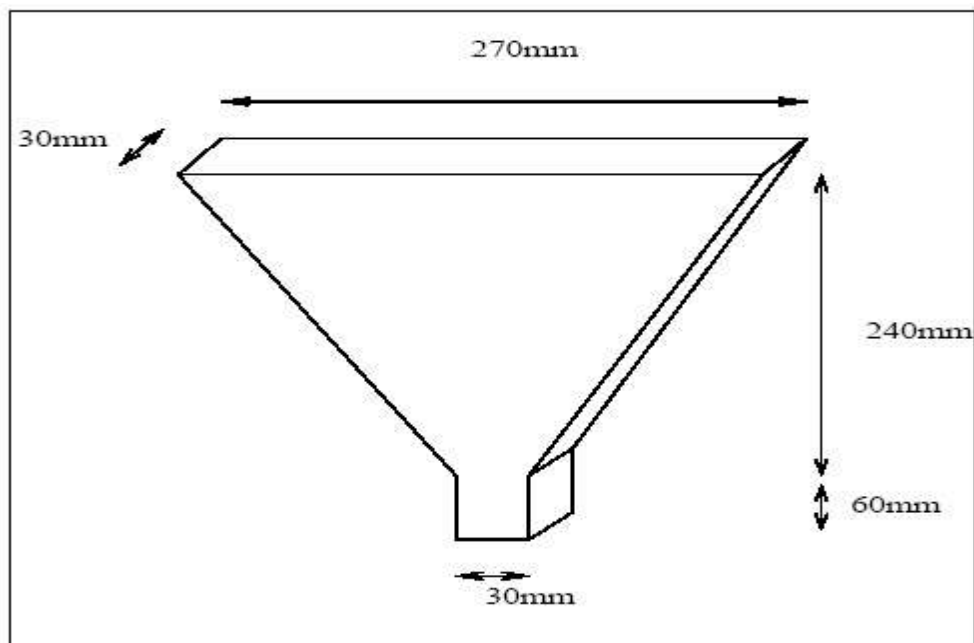


Figure 1.15 : Entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers [43]

7.2 Approche suédoise (CBI)

Cette méthode développée par CBI, se caractérise par la prise en compte de ferraillements importants. Elle est basée sur le principe de fluidité dans un milieu confiné.

Ils estiment pour un confinement donné et pour chaque rapport G/S, le volume de la pâte critique pour le blocage. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Le rapport E/C de la pâte et le type du ciment sont choisis en fonction de la gamme de résistance visée. Le dosage du superplastifiant est optimisé pour un écoulement autoplacant caractérisé essentiellement par les essais d'étalement. A fin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats, il faut ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats.

Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire, pour tout type de granulat.

7.3. Approche LCPC

Un modèle mathématique a été développé par de Larrard et al. [44] basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Ce modèle permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire entre les différents constituants du mélange. Les auteurs [44], déclarent que un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité.

Cette approche est basée sur les concepts suivants :

- le modèle de suspension solide. Ce modèle est un modèle analytique, permettant un calcul théorique de la compacité d'un mélange granulaire à partir des caractéristiques des constituants (compacités propres), des proportions du mélange et de la distribution granulaire.
- la Rhéométrie, qui prend en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche pour différents types de béton (bétons ordinaires, bétons à hautes performances, bétons autoplacants, etc.).

8. Exemples de Formulation

Constituant :	Quantité pour 1m³ :
<i>Eau</i>	<i>180 litres</i>
<i>Ciment</i>	<i>350 kg</i>
<i>Fines</i>	<i>200 kg</i>
<i>Sable</i>	<i>800 kg</i>
<i>Gravillons</i>	<i>900 kg</i> <i>(D_{max} limité à 16mm en général)</i>
<i>Adjuvant</i>	<i>6% du poids du ciment</i>

Tableau 1.2 : Exemples de formulations AFGC 2000 [3]

Type	Ciment Kg/m ³	Laitier Kg/m ³	Cendres Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Gravillons Kg/m ³	Eau Kg/m ³	super- plastifiant	Agent viscosi
I	200	200	100	0	704	898	165	6	0
II	180	220	100	0	753	926	170	7.7	1.5
III	300	0	0	200	700	910	170	8	0.2

Tableau 1.3 : Exemples de formulations japonaises [43]

Gâchée	Ciment Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Gravillons (10-14) Kg/m ³	Gravillons (5-12.5) Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Eau Kg/m ³	Super- plastifiant Kg/m ³
315	451	59	557	299	858	182.7	6.98
316	385	120	563	302	867	174.0	6.24
317	312	186	566	304	872	169.2	5.38
329	480	0	568	305	918	166.1	7.20
321	475	0	562	302	909	174.4	7.13
318	470	0	556	299	900	182.6	7.06

Tableau 1.4 : Exemples de formulations françaises [44]

Avec : AV : agent de viscosité, EA : entraîneur d'air, et SP : superplastifiant

9. synthèse

Le béton autoplaçant c'est un béton fluide, stable et homogène, qui ne nécessite aucune vibration.

Le BAP est un matériau qui présente deux aspects, le premier étant la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les coffrages fortement ferrailés sans aucune vibration et le deuxième constitue l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation.

La fluidité et la stabilité sont des propriétés contradictoires, mais ils sont possibles dans le cas d'introduction dans les formulations des adjuvants (superplastifiant, agents de viscosité, ...) et des additions minérales (fillers calcaires, fumée de silice, ...).

Dans ce chapitre nous avons détaillé les méthodes de formulations des BAP les plus connues, mais ces méthodes décrites ci dessus ne sont pas adaptés pour la formulation des bétons autoplaçants contenant des agents de viscosité, ce qui nécessite de faire des modifications sur les méthodes de formulation des B.A.P.

Chapitre 2

PROPRIETES RHÉOLOGIQUES DU BETON AUTOPLAÇANT

1. Introduction

La rhéologie est une science qui étudie l'écoulement des matériaux sous l'effet des contraintes. Il ya deux grandeurs physiques fondamentales qui composent la rhéologie, une grandeur appelée contrainte de cisaillement qui donne création de mouvement et deux grandeurs physiques cinématique appelées déformation et vitesse de cisaillement. Le but de la rhéologie est de décrire les relations entre les contraintes, les déformations et les vitesses de déformation d' un élément de volume.

Ce chapitre traite l'état de l'art sur la rhéologie des bétons autoplaçants (BAP), les hypothèses de la rhéologie des matériaux cimentaires, les modèles rhéologiques utilisés pour caractériser les BAP et l'influence des constituants des BAP sur la rhéologie.

2. La rhéologie

À partir de l'arrivée des BAP dans le domaine de la construction l'intérêt principal qui attire c'est la maniabilité, donc il n'est pas étonnant que plusieurs chercheurs se tournent vers la science de la rhéologie pour essayer de donner de meilleurs outils pour comprendre la maniabilité des bétons.

Une meilleure connaissance des propriétés rhéologiques des BAP (seuil de cisaillement, viscosité) permet de contrôler la ségrégation et le coulage multi-couches des BAP.

Nous présentons dans ce chapitre les notions de base de la rhéologie qui sont nécessaires pour caractériser les propriétés à l'état frais des BAP.

3. Définition des grandeurs rhéologiques

3.1. Contrainte de cisaillement τ [Pa]

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'arrivée de contraintes τ , qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche. Conrrazé G., Grossiord J.L [46].

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

$$\tau = dF/dS$$

où:

dS : surface élémentaire d'une couche cisillée.

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

3.2. Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ [s^{-1}]

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles emprisonnées entre 2 plans parallèles de surface, séparés d'une distance h . Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance dx à une vitesse constante de norme V_0 .

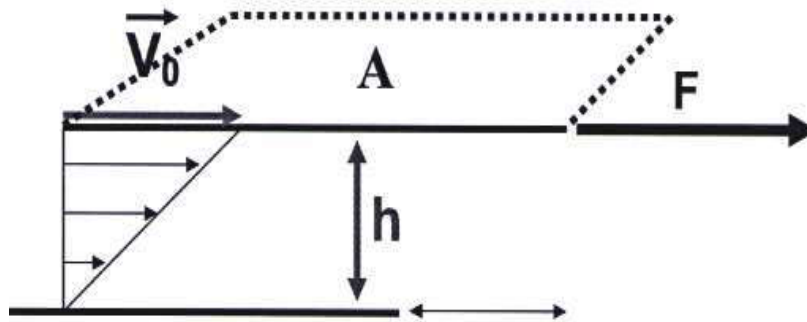


Figure 2.1 : Schéma de vitesse de cisaillement. [32]

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. Ils se créent un *gradient de vitesse* entre les deux plans.

Le déplacement entre les deux plans est définie comme *la déformation*, symbole γ suivant la relation:

$$\gamma = dx/dz$$

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. Conrrazé G., Grossiord J.L [46]

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz}$$

3.3. Viscosité dynamique μ [Pa.s]

La viscosité dynamique μ , appelée aussi viscosité apparente se caractérise par le déplacement d'une molécule dans un milieu encombré par les autres. C'est la caractéristique du fluide qui produit des forces de frottement quand il est mis en écoulement. Cet effet provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé la viscosité [46].

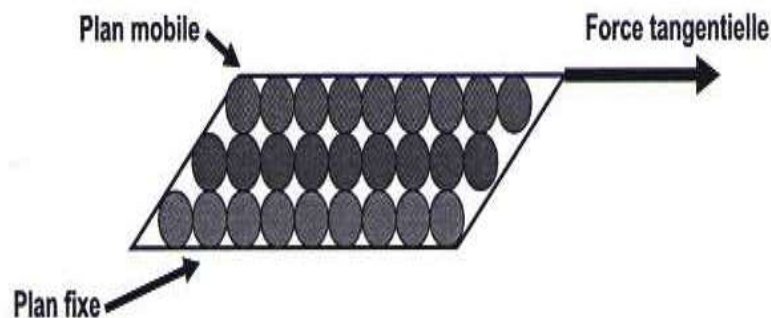


Figure 2.2 : Schéma glissement des couches [32]

La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle, le coefficient de viscosité est défini par la relation suivant :

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

Le coefficient de viscosité est une grandeur physique qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Sa connaissance satisfait parfois à caractériser le comportement rhéologique du matériau. Conrrazé G., Grossiord J.L [46]

3.4. Seuil de cisaillement τ_0 [Pa]

Le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimale pour initier l'écoulement d'un matériau. En dessous du seuil de cisaillement le matériau ne s'écoule pas.

Wallevik [47] a dit qu'il ya deux seuils de cisaillement conduisant à des notions physiques différentes :

Le seuil de cisaillement statique correspond à la contrainte nécessaire à fournir pour déclencher l'écoulement du matériau. Il correspond à la contrainte minimale fournie pour obtenir le premier signe d'écoulement.

Le seuil de cisaillement dynamique τ_0 , est la contrainte minimale pour stopper l'écoulement (passage de l'état viscoplastique à l'état solide). Il est obtenu par interpolation de la courbe d'écoulement à une vitesse de cisaillement nulle [48].

4. Comportement rhéologique

Une étude rhéologique permet d'analyser l'écoulement de matériaux subies à des contraintes et des déformations l'exploitations de ces paramètres conduit à l'élaboration des rhéogrammes qui relient généralement la contrainte de cisaillement τ à la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$.

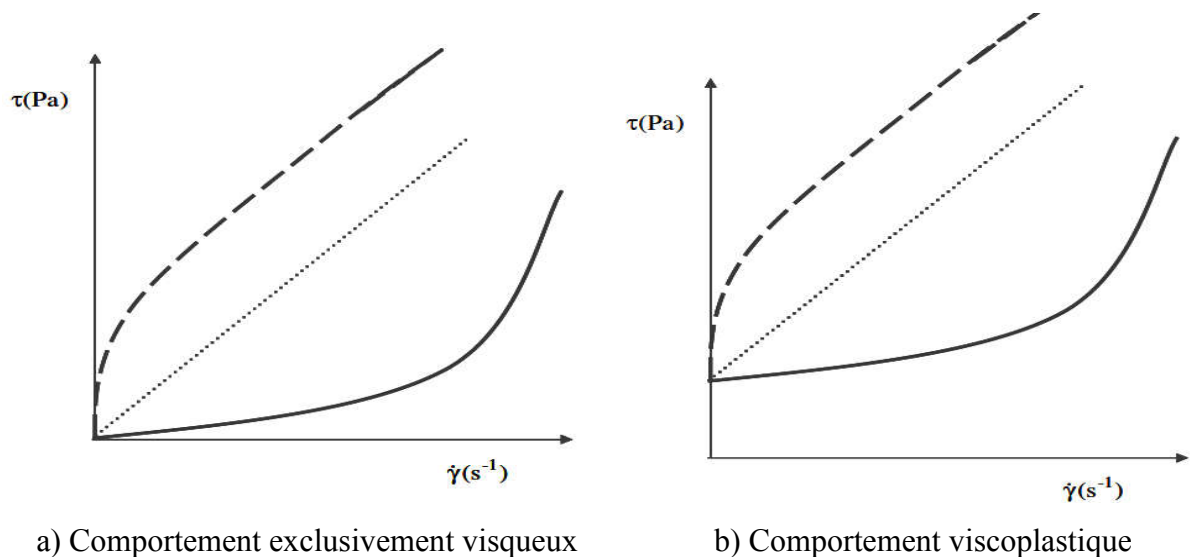


Figure 2.3 : lois de comportement rhéologique [48]

Le fluide newtonien caractérisé par une relation linéaire entre la contrainte et la vitesse de cisaillement : $\tau = \mu \dot{\gamma}$ (Figure 2.3 a).

Le fluide est dit rhéofluidifiant dans le cas où la courbe d'écoulement présente une concavité tournée vers l'axe des vitesses de cisaillement, dans le cas contraire, il est rhéoépaississant.

Il ya autres fluides qui ne s'écoulent qu'une fois le seuil de cisaillement dépassé. Ce sont des fluides viscoplastiques (Figure 2.3 b). [48]

Modèles rhéologiques de base

Les modèles de comportement rhéologique des fluides sont récapitulés dans le tableau 2.1 suivant.

Tableau 2.1 : Modèles de comportement rhéologique des fluides [49].

Auteur	Loi de comportement
Newton (1687)	$\tau = \mu \dot{\gamma}$
Bingham (1922)	$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$
Herschel Berkley (1926)	$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$
Ostwald (1925)	$\tau = A\dot{\gamma}^n$
Von-berg	$\tau = \tau_0 + b \sinh^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Sisko	$\tau = a\dot{\gamma} + b\dot{\gamma}^c$
Robertson-Sttif	$\tau = A(\dot{\gamma} + B)^c$
Eyring	$\tau = a \sinh(b \dot{\gamma})$

Avec :

τ : contrainte de cisaillement [Pa]

μ : viscosité [Pa.s]

$\dot{\gamma}$: le taux de cisaillement [1/s]

Concernant le comportement rhéologique des matériaux cimentaires de nombreux auteurs [50,51] ont montré que les matériaux cimentaires sont des fluides viscoplastiques soumis au modèle de Bingham :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Les résultats de Mouret et al [50] rapportent que les bétons autoplaçants et les pâtes contenant du superplastifiant, avaient généralement un comportement non linéaire de type Herschel-Bulkley.

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (2.2)$$

ou:

τ est la contrainte de cisaillement (Pa), $\dot{\gamma}$ le gradient de vitesse (s⁻¹), τ_0 est le seuil de cisaillement), k et n sont des constantes caractéristiques.

Certains auteurs [51] montrent que le comportement rhéologique des pâtes du béton dépend fortement de nature des adjuvants et type des additions minérales

5. La thixotropie

La thixotropie peut être définir comme une diminution de la viscosité d'un matériau dans le temps sous l'effet d'une contrainte de cisaillement (figure 2.4). La caractéristique de ce phénomène est réversible, qui permet au matériau de retrouver sa viscosité initiale lorsque la contrainte a disparu. Aussi pendant la période de désorganisation, la contrainte de cisaillement assez élevée est convenable de détruire la cohésion interne du matériau et générant une réduction de la viscosité.

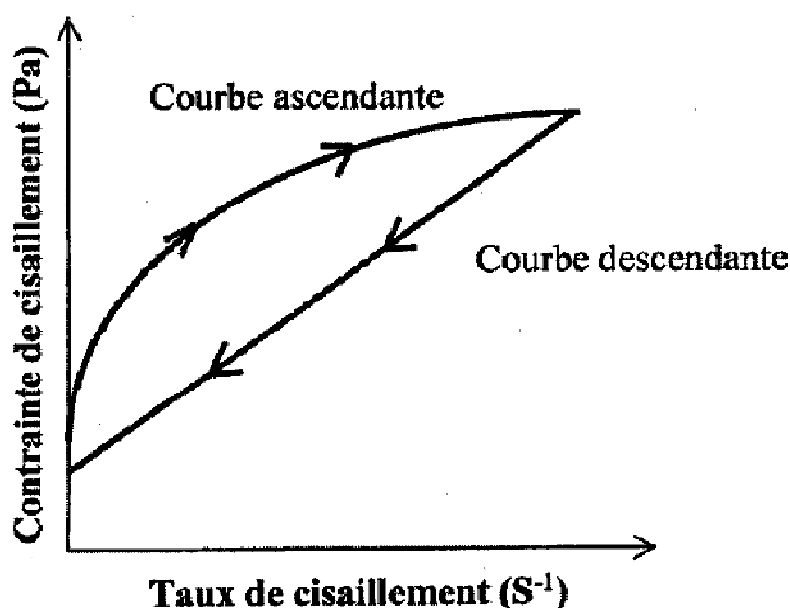


Figure 2.4 : Le corps thixotropique [52]

6. Caractérisation des BAP à l'aide du rhéomètre

L'utilisation du rhéomètre permet de caractérisation rhéologique des matériaux cimentaires (pâte, mortier, béton) à l'état frais, il ya différentes type de rhéomètres qui peuvent être décrire le comportement rhéologique des matériaux cimentaire :

- Le viscosimètre à plaque parallèle BML ;
- Le rhéomètre coaxial BTRHÉOM ;
- Le rhéomètre coaxial CEMAGREF-IMG ;
- Le rhéomètre coaxial RHÉOCAD

Généralement les rhéomètres mesurent le couple résistant du béton en fonction de la vitesse d'écoulement imposée. Ces deux données permettent ensuite d'obtenir, par

différents calibrages, les grandeurs caractéristiques de l'écoulement du béton, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique [53].

Mais la présence de granulats de tailles variées dans le béton ne permet pas de définir un matériau type pour tous ces rhéomètres qui servirait de référence à toutes les mesures.

L'auteur [24] dit que les mesures rhéologiques sont difficiles à mesurer dans le cas des bétons, du fait des particules qui les composent (de 1 μm à 20 mm). La figure 2.5 présente certains de ces Rhéomètres.

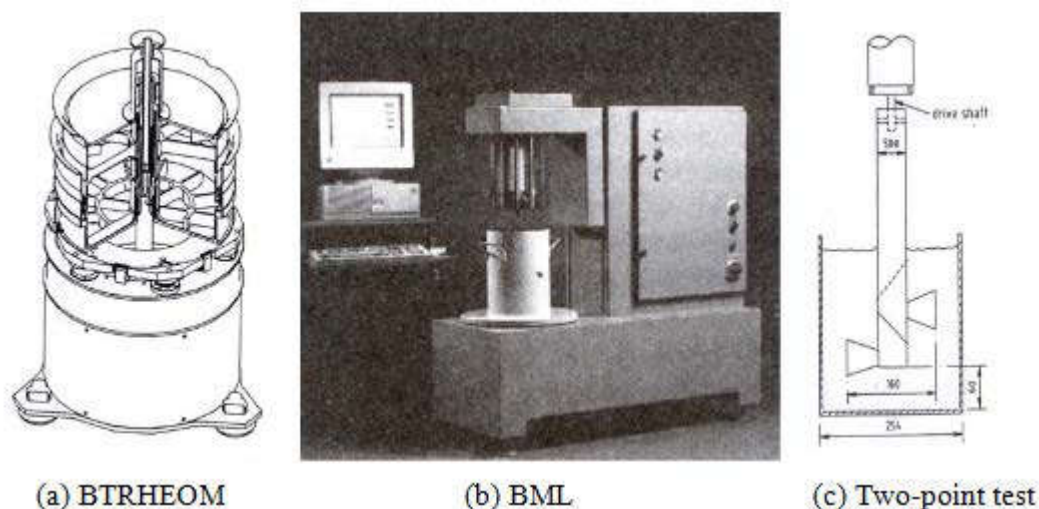


Figure. 2.5 : Rhéomètres développés pour les bétons [53].

7. Caractérisation des BAP à l'état frais

7.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams

Généralement cet essai est l'essai le plus connu pour ce type de béton (figure 2.6).

Cet essai permet de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton présence d'une épaisseur de laitance en périmètre de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier. L'étalement est mesuré sur deux diagonales. L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50 cm et 80 cm en fonction de l'utilisation du béton [54]. Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50 cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton.

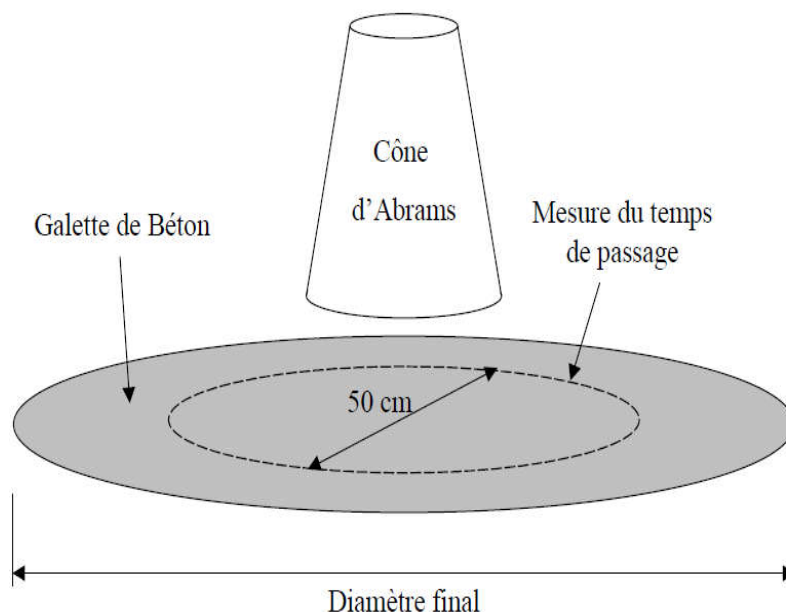


Figure 2.6 : Schématisation de l'essai d'étalement au cône d'Abrams [3]

7.2. Essai J-Ring

Cet essai s'effectue au travers d'un anneau équipé de barres (*J-ring*) simulant des armatures et permet de mesurer la mobilité en milieu confiné (figure 2.7). Cet essai est simple à exécuter et fournit de nombreuses informations. Le principe de l'essai est l'écoulement d'un échantillon de béton à travers des armatures sous son propre poids. L'objectif visé par son utilisation est double ; par un seul essai il permet à la fois d'apprécier la déformabilité libre et la déformabilité restreinte et cela sur un seul échantillon de béton. Cet essai consiste à réaliser l'essai d'étalement au cône d'Abrams modifié par ajout d'un anneau de 300 mm de diamètre de hauteur de 140 mm sur lequel sont fixées 16 tiges à diamètres de 12 mm (Figure 2.7). Le mode opératoire de l'essai est identique à celui de l'étalement d'un BAP [55]. Trois mesures sont accessibles avec cet essai :

- mesure de l'étalement final (mm),
- mesure du temps d'écoulement T500 en secondes,
- mesure du blocage qui est donné par la différence de niveau entre le béton du centre de la galette formée et le béton au périmètre externe de l'anneau (mm).



Figure 2.7 : Essai de J-Ring [55]

7.3. Essai de l'écoulement à l'entonnoir (V-funnel)

Le temps mesuré fournit une indication sur la viscosité du béton. Plus le temps de passage est long, plus le béton est visqueux, inversement plus le temps est court moins le béton est visqueux. Cette méthode permet d'évaluer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de béton passant à travers l'ouverture d'un entonnoir (figure 2.8).

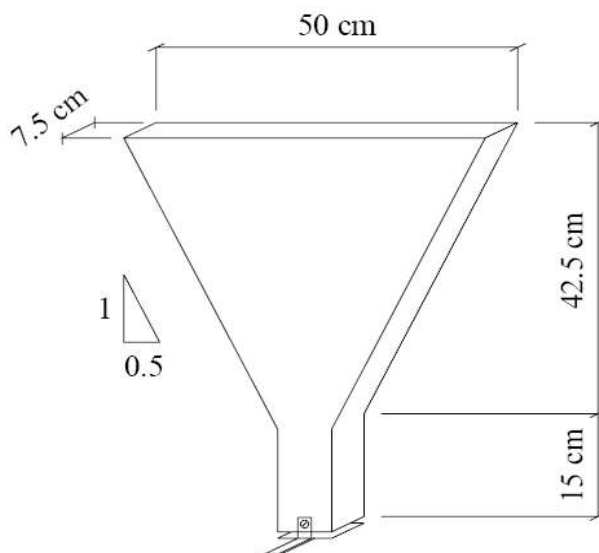


Figure 2.8 : Schématisation de l'essai à l'entonnoir V-funnel [3]

Le guide européen sur les BAP fournit une classification des BAP selon le type d'application et le temps de passage au V-funnel [55].

Deux classes sont alors définies :

- Classe VF1 : temps d'écoulement ≤ 8 s;
- Classe VF2 : temps d'écoulement ≥ 9 s et ≤ 25 s.

Lorsque le temps d'écoulement trop long ou une discontinuité d'écoulement sont des indicateurs de blocage et de ségrégation des bétons, Ces phénomènes apparaissent dans deux cas différents, lorsque le béton est très visqueux ou lorsque le béton est ségrégeant. Pour ce dernier cas, une voûte de cailloux se forme à l'ouverture basse de l'entonnoir et le flux du béton devient alors bloqué.

7.4. Essai de l'écoulement à la boîte en L

L'objectif de cet essai est de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.

L'essai dans la boîte en L (figure 2.9) associe la mesure de la vitesse d'écoulement et de la mobilité en milieu confiné, et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

Le principe de l'essai est le suivant :

- La partie verticale est entièrement remplie de béton.
- On laisse reposer pendant une minute puis on lève la trappe (représentant les armatures en aciers du béton armé) et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage.
- Lorsque le béton ne s'écoule plus dans la partie horizontale, on mesure le rapport des hauteurs H_1 et H_2 .

A la fin de l'écoulement du béton, les rapports des bétons H_2 sur H_1 doit être supérieur à 0,8 pour les bétons autoplaçants [5].

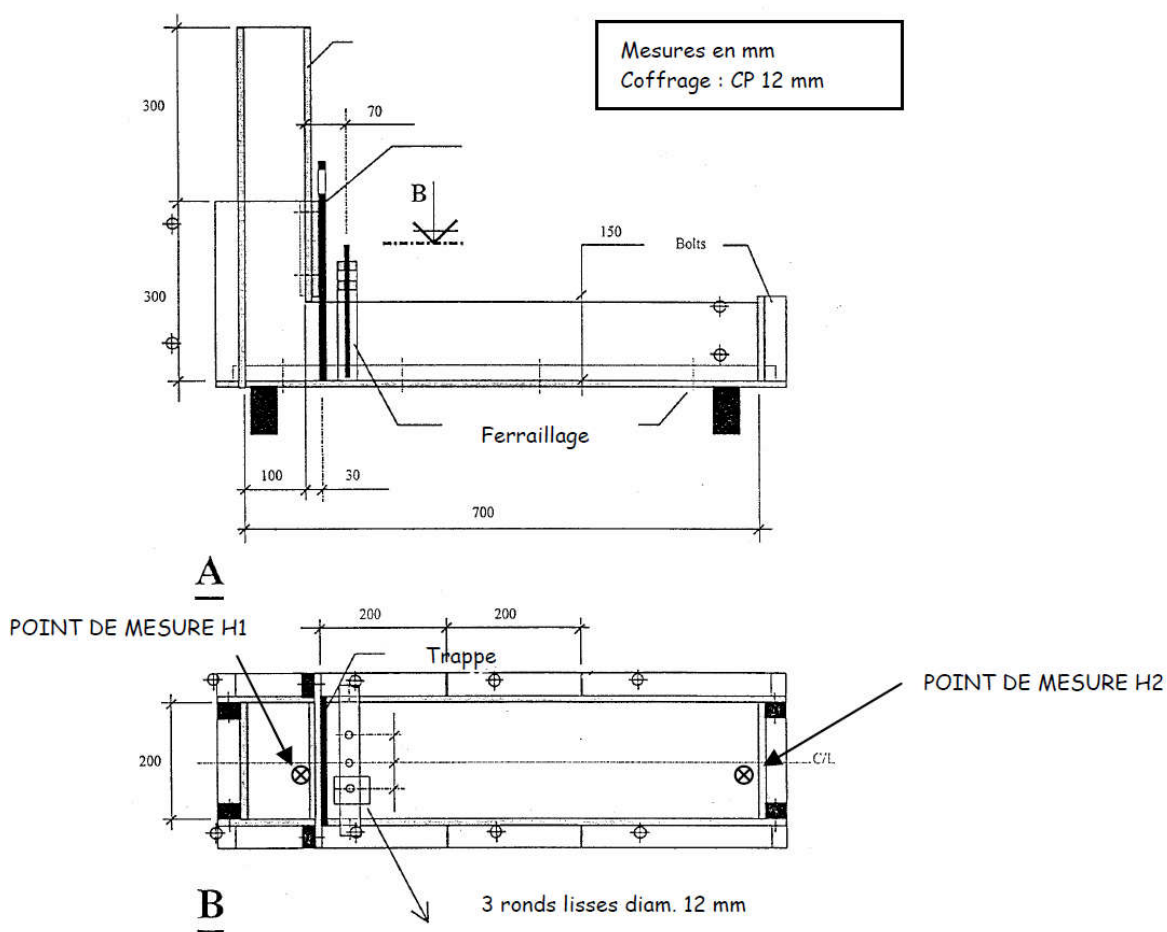


Figure 2.9 : Schématisation de la boîte en L [5]

7.5. Essai de l'écoulement au tube en U

Le dispositif de cette essai (figure 2.10) est composé de deux cases R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante. Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier et spécifications des différents pays), après l'écoulement on mesure la hauteur de remplissage dans la partie R2, celle-ci doit être supérieure à 30cm pour un BAP.

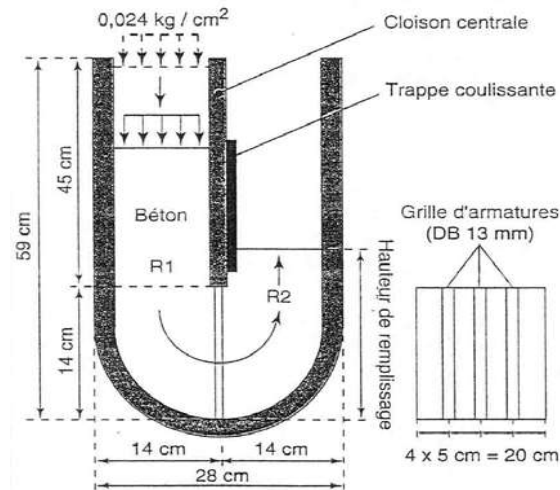


Figure 2.10 : Schématisation de l'essai du tube en U [55]

7.6. Essai de l'écoulement au caisson

Cet essai consiste à verser le béton dans la partie gauche du caisson jusqu'à atteindre la hauteur h_1 des armatures supérieures. Une observation visuelle est effectuée afin de juger qualitativement la capacité de passage et de remplissage, et de noter la présence d'un certain blocage.

Cet essai destiné au test des bétons très fluides qui ne contenant pas de gravier de taille supérieure à 25 mm. Son avantage principal réside en la visualisation du comportement du béton autoplaçant,

La relation suivante montre la caractérisation quantitative du taux de remplissage [57]:

$$R(\%) = (h_1 + h_2) / 2h_1$$

Où h_1 et h_2 sont les hauteurs mesurées du béton, Pour un béton autoplaçant, le taux de remplissage au caisson doit être supérieur à 60% [45].

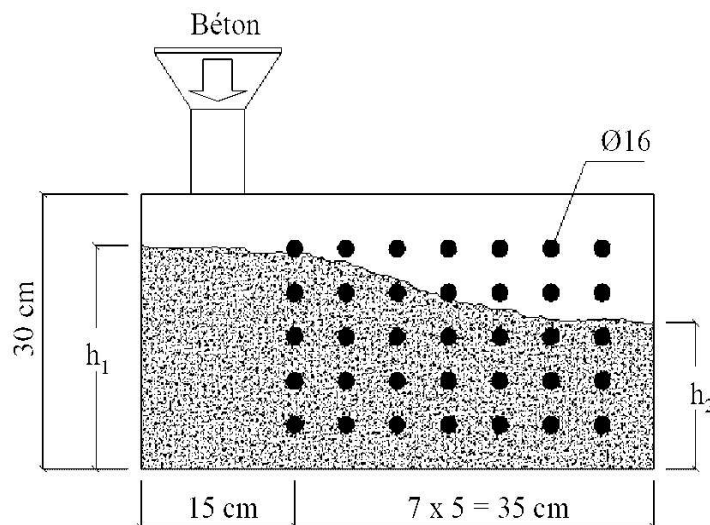


Figure 2.11 : schématisation de l'essai de caisson. [58]

7.7. Essai de la passoire

Cet essai est actuellement rarement utilisé puisqu'il nécessite un grand volume de béton environ de 30 litres.

Le test est réalisé pour détecter les premiers signes de blocage avec un volume de 30 litres de béton, versé dans le récipient équipé dans sa partie inférieure de la grille d'armature. Le récipient est soulevé verticalement laissant le béton s'écouler à travers la grille. Une pression est exercée sur la surface supérieure de l'échantillon de béton afin de tester son comportement à différentes conditions d'écoulement (pression supérieure à celle de l'écoulement à l'essai au caisson) [57].

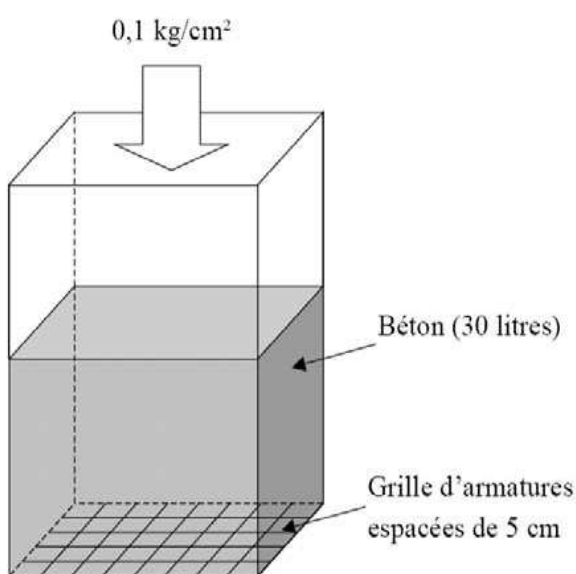


Figure 2.12 : Schématisation de l'essai de passoire [57].

7.8. Essai de la stabilité au tamis

Le principe de cet essai consiste à remplir une quantité de béton 2 litres sur un tamis de maille 5 mm avec une hauteur de chute de 50 cm. Puis au bout de 2 minutes, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis.

L'objectif de cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP qui doit être stable sous l'effet de la gravité.

Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 et 20 %.

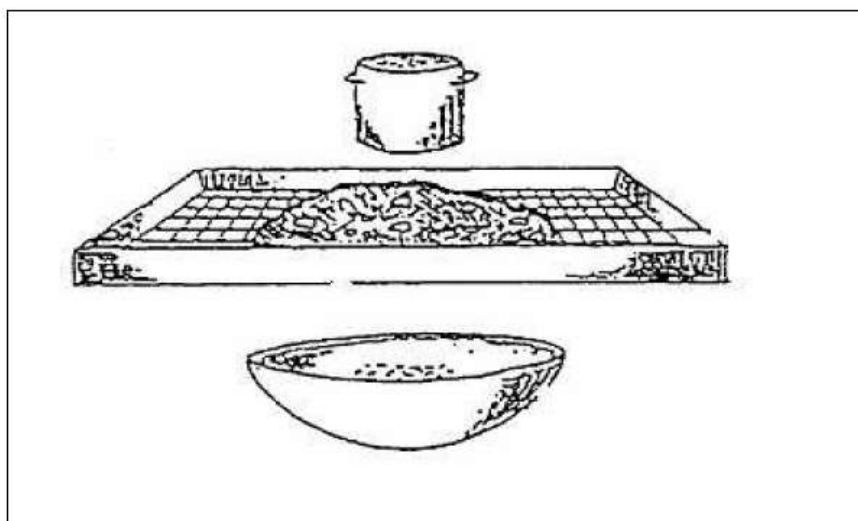


Figure 2.13 : Schématisation de l'essai de stabilité au tamis [3]

Le pourcentage de laitance par rapport au sous-échantillon est alors désigné comme étant l'indice de stabilité, Selon AFGC [3] les résultats des BAP sont classés en trois classes:

- $0 \leq \pi \leq 15 \%$ stabilité satisfaisante.
- $15 \% < \pi \leq 30 \%$ stabilité critique
- $\pi \geq 30 \%$ béton inutilisable.

8. Corrélation entre l'expérimental – et les mesures des paramètres rhéologiques

Les travaux de Emborg [59] montrent que il ya une faible corrélation entre le seuil d'écoulement extrapolé par le modèle de Bingham et la mesure d'étalement, en revanche les résultats obtenues par Ferraris et al [60] sur les bétons autoplaçant montrent une bonne corrélation entre le seuil de cisaillement extrapolé par le modèle de Herschel-Bulkley et l'étalement, les différentes résultats sont présentés sur la figure 2.14.

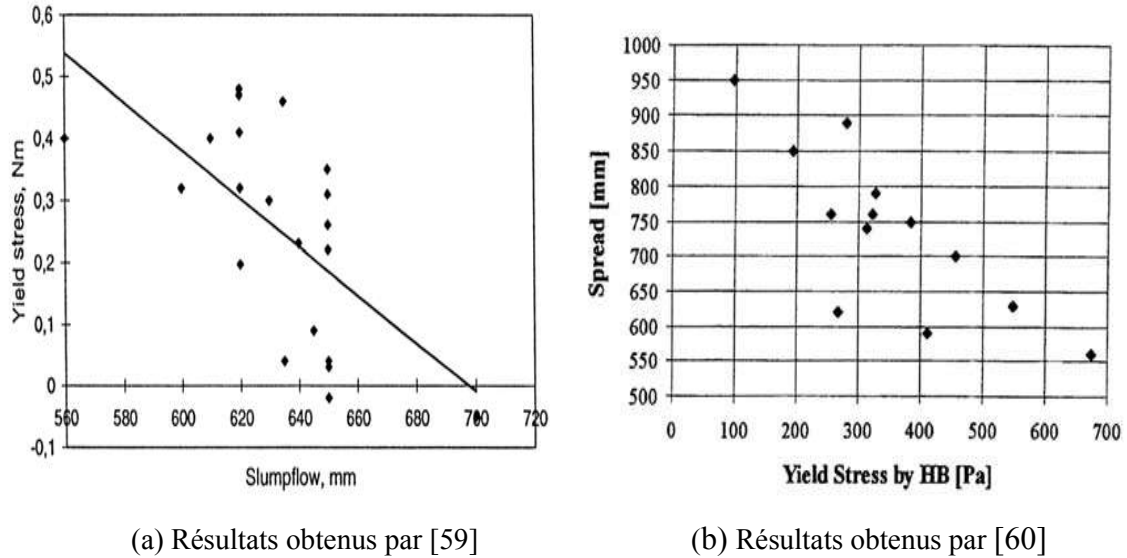


Figure 2.14 : Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'étalement (Cité par [11]).

Les modèles rhéologiques sont des outils mathématiques utilisés pour caractériser le comportement d'un matériau lors de son écoulement. Plusieurs modèles rhéologiques ont été proposés depuis le début de l'étude de la rhéologie. Une revue bibliographique des formules permettant de relier l'étalement au seuil de cisaillement τ_0 est représenté dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2. Formules de la littérature permettant de relier l'étalement au seuil de cisaillement [2]

Auteurs	Seuil de cisaillement τ_0 associé à l'étalement $Etal$ (Pa)
Kurokawa <i>et al.</i> [1994]	$\frac{\rho g V \cdot 10^8}{25\sqrt{3}\pi \cdot Etal^2}$
Coussot <i>et al.</i> [1996]	$\frac{\rho 279^5}{Etal^5}$
Sedran [1999]	$\frac{\rho(808 - Etal)}{1174}$
Coussot et Roussel [2005]	$\frac{225\rho g V^2}{128\pi^2 Etal^5}$
Lanos <i>et al.</i> [2011]	$\sqrt{\frac{2\tau_0}{\rho g}} \left[\frac{8\pi}{15} (Etal - R_0)^{\frac{5}{2}} + \frac{4\pi}{3} R_0 (Etal - R_0)^{\frac{3}{2}} + \pi R_0^2 (Etal - R_0)^{\frac{1}{2}} \right] + \pi R_0^2 \sqrt{3} \frac{\tau_0}{\rho g} - V_0 = 0$

Dans la littérature, nombreux auteurs montrent qu'il y a une corrélation entre le temps d'écoulement mesuré au V-funnel [71] et aussi au T500 [59] et la viscosité plastique mesuré à l'aide de rhéomètre comme le montre la figure 2.15

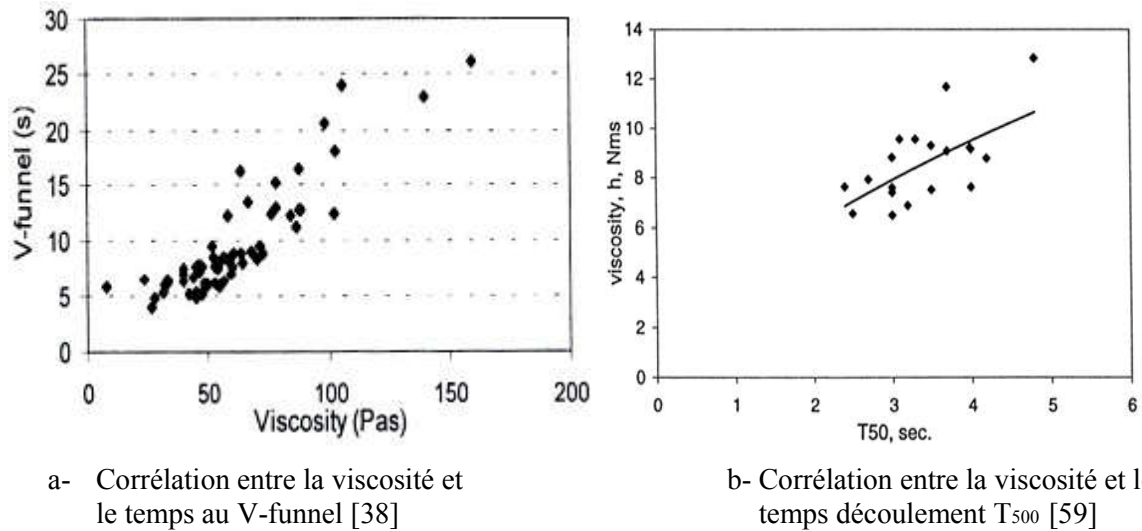


Figure 2.15 : Corrélation entre la viscosité et le temps d'écoulement (Cité par [11]).

L'auteur [61] a proposé un modèle mathématique pour calculer la viscosité en fonction de temps d'écoulement et le seuil de cisaillement pour les formulations de BAP.

$$\mu = \frac{T500}{0,002 \times \tau_0} \quad (2.3)$$

Ou :

μ : Viscosité plastique du matériau en (Pa.s),

T500 : Temps que met la galette à atteindre un diamètre de 500 mm (en seconde),

τ_0 : Seuil de cisaillement (Pa).

9. Effet des constituants du béton

Tous les constituants d'un mélange influencent sur le comportement rhéologique d'un béton frais. Les principaux paramètres influençant sur le comportement rhéologique du béton frais sont les suivants :

L'air

Les agents entraineur d'air sont des adjuvants qui permettent d'entraîner dans les matériaux cimentaires, généralement plus le ciment est fin plus le dosage en entraineur d'air doit être augmenté.

Les travaux de Wallevik [62] affirment que l'augmentation du volume d'air réduit la viscosité plastique des bétons.

Superplastifiant (SP)

L'utilisation de SP dans la formulation des bétons permet d'empêcher l'agglomération des particules de ciment et de libérer l'eau cloîtrée dans ces agglomérats.

D'après les résultats de Phan [63] l'incorporation de SP influent immédiatement sur la thixotropie de la pâte, plus le dosage en superplastifiant est élevé, plus la capacité de reprise de la viscosité diminue.

Les travaux de Husson [64] sur l'effet de divers superplastifiants sur le seuil de cisaillement rapportent que l'ajout de superplastifiant de type Polycarboxylate (PCE) diminue le seuil de cisaillement plus que divers superplastifiants.

Agent de viscosité (AV)

Les agents de viscosité sont des produits qui augmentent la viscosité, ils sont composés de molécules de longues chaînes de polymères qui vont fixer l'eau interstitielle en la rendant plus visqueuse. L'augmentation du dosage de l'agent de viscosité augmente la viscosité des bétons et leur stabilité par une augmentation des forces de frottement visqueux des molécules du fluide suspendant sur les particules [65]. Les travaux de Claude et al [66] affirment que l'effet de l'agent de viscosité ne réagit pas avec les grains de ciment et les ajouts cimentaires, mais il est en opposition avec le SP adsorbé sur les grains de ciment, donc il peut changer l'adsorption du SP à la surface du ciment.

Volume de pâte

Un mélange de béton est composé de granulats et de pâte cimentaire, la pâte se compose généralement de liant, d'eau et d'air. Dans un mélange de béton, la pâte cimentaire joue le rôle de colle, liant ainsi les granulats pour former un solide [67].

Les résultats de Girish [68] ont montré que l'augmentation du volume de pâte dans les formulations des bétons autoplaçants provoque une augmentation linéaire de la fluidité de ces BAP, mais existe un point optimal du volume de pâte. Quand la quantité de pâte dépasse cette limite, la fluidité diminue.

L'effet de l'eau dans la pâte de ciment est de séparer les granulats les uns des autres pour diminuer les frottements entre eux.

Hu [28] déclare que une augmentation de la teneur en eau pour une teneur en ciment constante, provoque une diminution de concentration de solide. Avec l'augmentation de la teneur en ciment, le volume de pâte augmente. Il y a donc plus de pâte pouvant s'écouler entre les granulats, augmentant ainsi la distance entre eux. Les résultats de Westerholm [69]

montrent que l'augmentation du volume de pâte mène à diminution de seuil de cisaillement (figure 2.16).

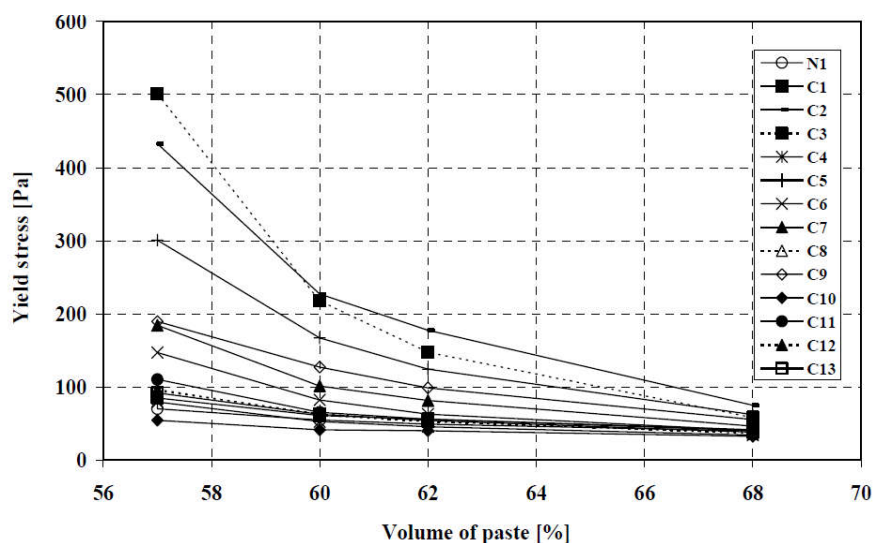


Figure 2.16 : Influence du volume de pâte sur le Seuil de cisaillement pour un rapport E/C constant [69]

Le même auteur [69] déclare que la viscosité plastique aussi diminue en fonction du volume de pâte. La figure 2.17 suivante représenté les courbes d'évolution de la viscosité plastique en fonction du volume de pâte pour un rapport (Eau/Ciment) constant.

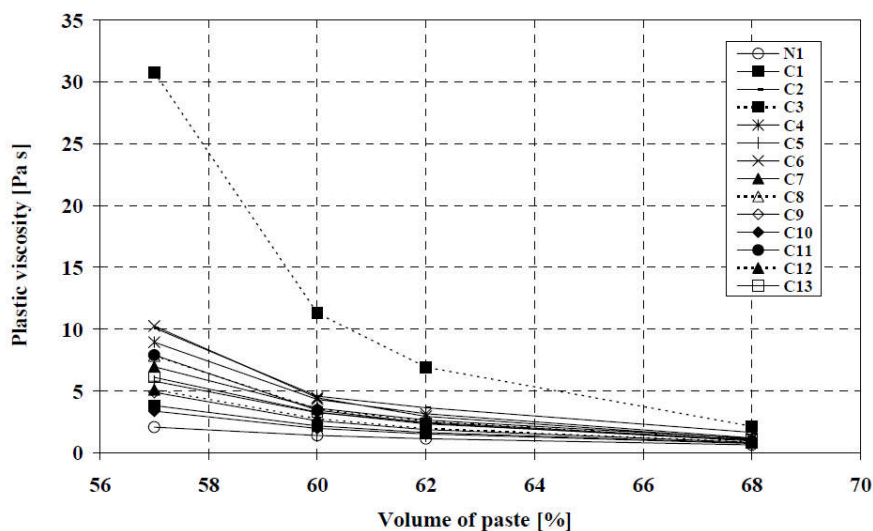


Figure 2.17 : Influence du volume de pâte sur la viscosité plastique pour un rapport E/ciment constant [69]

Rapport eau/ciment

Le rapport eau/ciment du BAP représente un facteur très influent sur les différents aspects. Certains auteurs [70] montre que l'introduction excessive d'eau provoque la diminution de la résistance mécanique du béton.

Le type de la pâte de ciment est immédiatement liée à la quantité d'eau utilisée en rapport à la quantité de ciment utilisée dans le mélange, la réduction de la teneur en eau dans un mélange de béton augmente la résistance mécanique, améliore la durabilité et réduit le retrait du béton [71].

[69] affirme que l'augmentation du rapport eau/ciment provoque une diminution des paramètres rhéologiques.

Effet des additions minérales

Les additions minérales sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton durci par action hydraulique ou pouzzolanique. Ces matériaux sont généralement catégorisés comme ajouts cimentaires ou ajouts minéraux [72]. La littérature affirme que l'utilisation des fines comme la fumée de silice et les laitier de haute fourneau améliore les propriétés rhéologiques des bétons.

Dans une étude de l'influence de ces additions sur le seuil de cisaillement et la viscosité des mélanges cimentaires, Park et Al [73] mentionne que l'utilisation des fines améliore mieux la rhéologie et les mélanges qui contiennent cendres volantes améliore mieux que ceux formuler avec les laitier de haute fourneau.

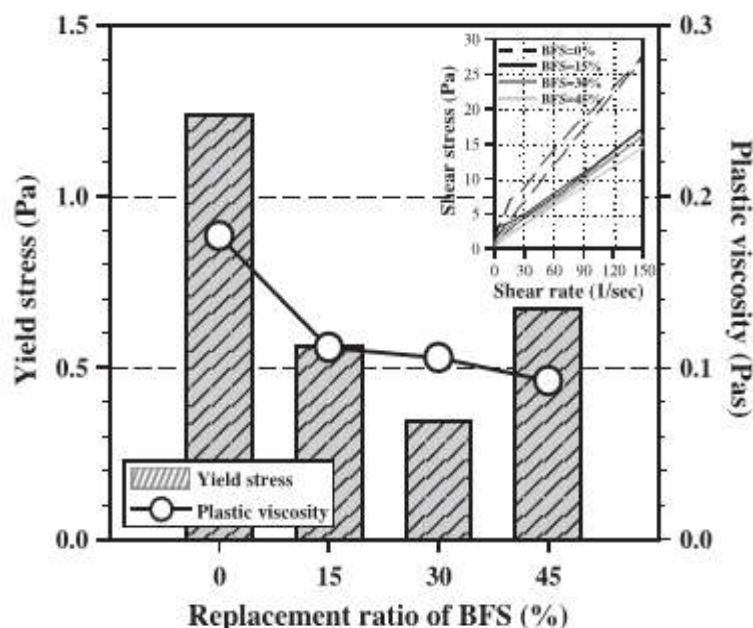


Figure 2.18 : Effet du laitier de haut fourneau sur les propriétés rhéologiques d'un mélange cimentaire [73]

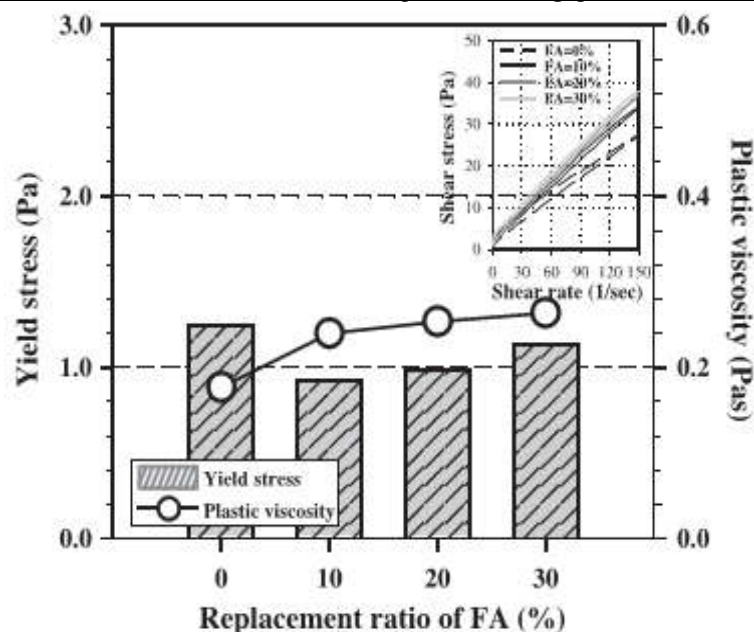


Figure 2. 19 : Effet de la cendre volante sur les propriétés rhéologiques d'un mélange cimentaire [73]

Dans une étude de Natallia S [74] sur les mortiers autoplaçants avec des additions minérales (cendres volantes, laitier de haute fourneau, fumées de silice et du métakaolin de classe F) ajoutées en combinaisons binaires, ternaires et quaternaires à un ciment Portland ordinaire avec et sans adjuvants chimiques. Les propriétés rhéologiques ont été évalué et les résultats montrent qu'il ya une relation linéaire entre le seuil de cisaillement et la surface spécifique de ces additions.

Alireza et al [75] affirme que la granularité des additions et le paramètre clé qui détermine le seuil de cisaillement d'un mélange cimentaire, dans son étude, l'auteur à proposer un modèle pour prédire le seuil de cisaillement en fonction de la distribution des particules des additions minérales, et du rapport Eau / Liant, ce qui fournit une bonne description des données expérimentales sur le seuil de cisaillement.

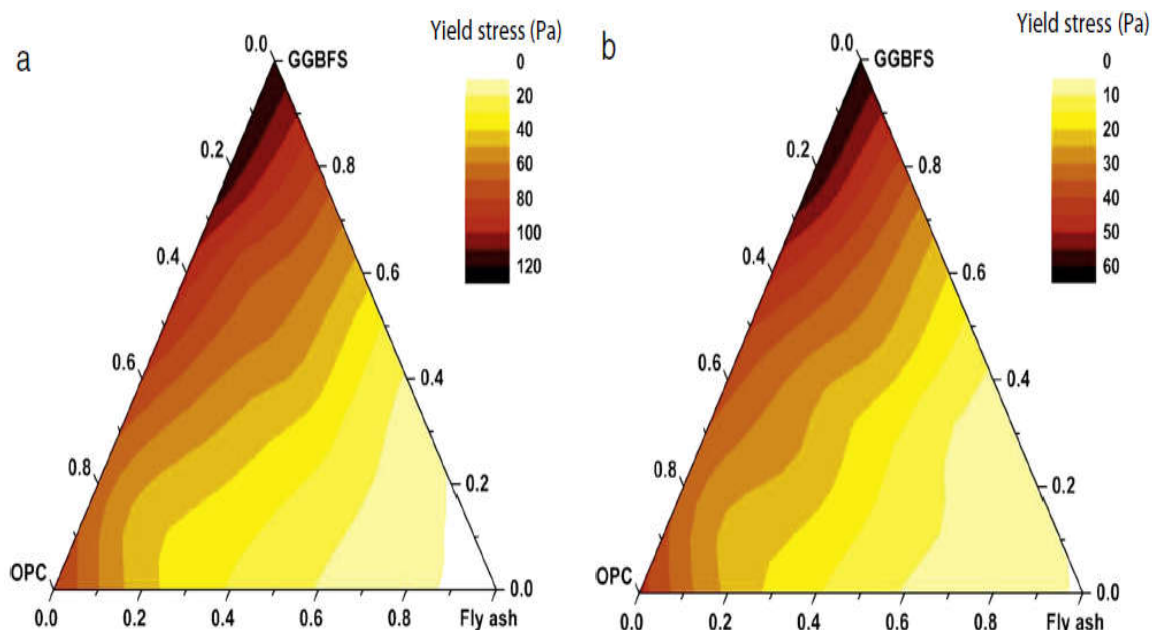


Figure 2. 20 : Diagrammes ternaire de seuil de cisaillement pour le système ciment portland-Laitier de haute fourneau- cendre volante pour les rapports E / masse solide (a) 0,39 et (b) 0,45. [75]

Granulats

Les granulats à une grande influence sur les propriétés rhéologiques des bétons autoplaçants de plusieurs façons par leur volume par rapport au volume total du béton, par leur diamètre maximal, par leur distribution granulaire et par leur nature et leur forme [76].

Les bétons de granulométrie continue améliorent les propriétés rhéologiques des bétons, certains auteurs [77,78] montrent que la viscosité plastique minimale des bétons est obtenue pour des compacités granulaires élevées.

Dans une étude de l'influence des gros granulats sur la rhéologie d'un béton et à l'aide d'un rhéomètre de type IBB, Jiong Hu [79] affirme que l'utilisation d'un volume très élevée des gros granulats avec un volume normal des petites granulats dans un mélange béton augmente les valeurs des paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité).

10. Synthèse

Dans ce chapitre nous avons défini les paramètres rhéologiques essentiels qui concernent le comportement rhéologique et les types de comportement associé des matériaux cimentaires (le béton autoplaçant et la pâte de ciment), aussi nous avons cité les principaux tests empiriques qui sont caractérisé l'ouvrabilité d'un béton autoplaçant. Les propriétés rhéologiques obtenues à l'aide des rhéomètres. Les différentes études bibliographiques qui traitent de l'existence de corrélation entre les essais empiriques et les essais à l'aide de rhéomètre affirment une bonne corrélation entre la viscosité et le temps d'écoulement d'un part et le seuil d'écoulement et leur étalement d'autre part des BAP.

De nombreuses études montrent que comportement du béton est influencé par les paramètres de formulation, des effets du rapport E/C, des granulométries, les pourcentages des granulats, adjuvants organiques et les additions minérales.

Deuxième partie

PÂTES AUTOPLAÇANTES :

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Chapitre 3

MATÉRIAUX ET MÉLANGES : PÂTES DE CIMENT

1. Introduction

Le travail présenté dans ce chapitre a pour objectif de caractériser des pâtes autoplaçantes à l'état frais avec différents constituants des pâtes, notamment le dosage d'ajouts minéraux (poudre de marbre, poudre de verre et laitier granulé). Cette caractérisation est effectuée par l'essai d'étalement au mini-cône et l'écoulement au cône de Marsh.

Nous commencerons, dans ce chapitre, par présenter les matériaux qui ont été utilisés dans l'étude de l'écoulement des pâtes. Nous présentons par la suite le mode expérimental ainsi que le matériel utilisé pour la caractérisation des pâtes autoplaçantes à l'état frais. Nous terminons par la présentation et l'interprétation des résultats des essais d'étalement au mini-cône et l'écoulement au cône de Marsh effectués sur les différents mélanges.

2. Matériaux utilisés

2.1. Ciment

Le ciment utilisé pour l'ensemble des compositions est un ciment portland composé (CEM II/A - 42,5) obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts (gypse et calcaire) conforme à la norme algérienne NA 442, provenant de la cimenterie de groupe LAFARGE.

Tableau 3.1. Composition chimique du ciment CEM II 42,5

Élément	%
SiO ₂	16,80
Al ₂ O ₃	4,46
Fe ₂ O ₃	2,94
CaO	58,83
MgO	1,68
SO ₃	2,35
K ₂ O	0,60
Na ₂ O	0,03
P ₂ O ₅	0,15
TiO ₂	0,22
P.A.F	11,74

Tableau 3.2. Caractéristiques physiques du ciment CEM II 42,5

Consistance normale	28,2 %
Début de prise (Dp)	155 mn
Fin de prise (Fp)	280 mn
Masse spécifique	3,02 g/cm ³
Surface spécifique (SSB)	3995 cm ² /g

Tableau 3.3. Composition minéralogique du ciment CEM II 42,5

Minéraux	%
C ₂ S	12-18
C ₃ S	58-64
C ₃ A	6-8
C ₄ AF	10-12

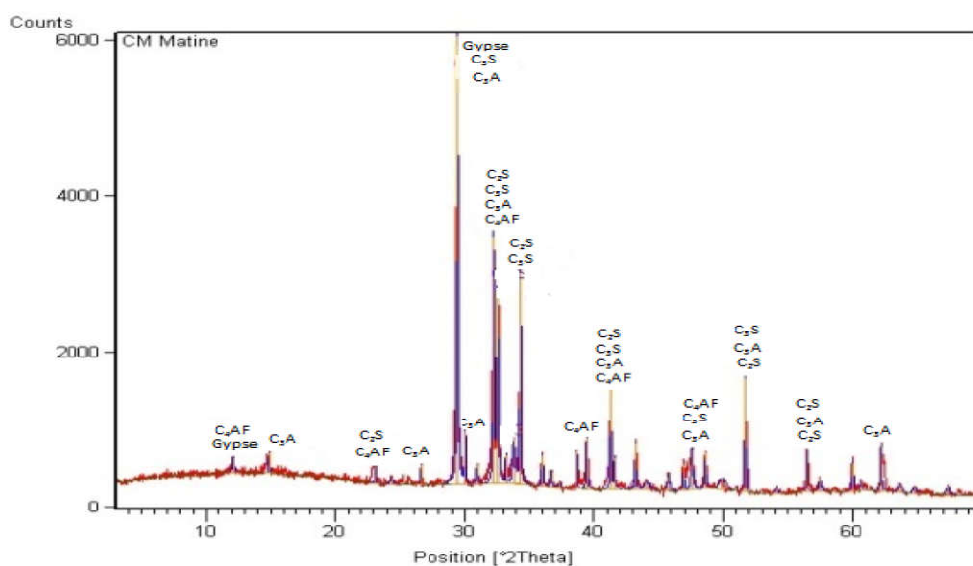


Figure 3.1 : Diffractogramme du ciment anhydre.

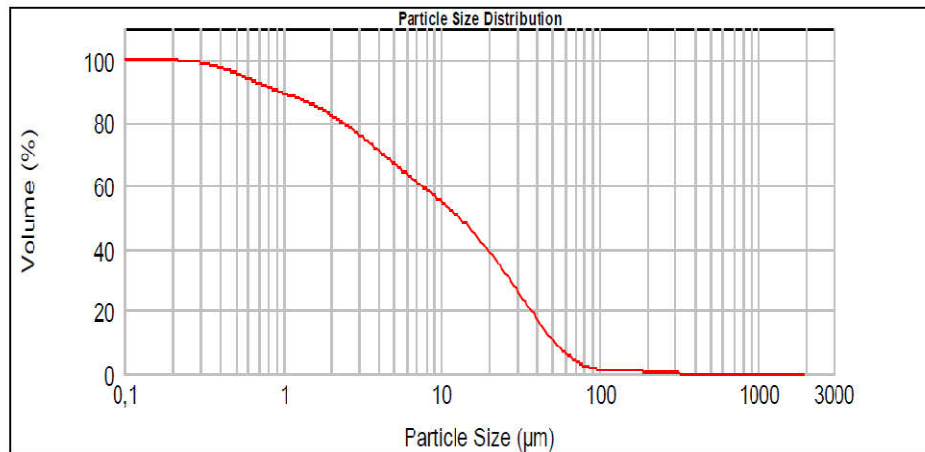


Figure 3.2 : Distribution granulométrique du ciment anhydre CEM II 42,5.

Tableau 3.4. Évolution de la résistance à la compression du ciment CEM II 42,5

Age	Résistance à la compression MPa (NA 234)
2 jours	23,42 ± 0,06
7 jours	38,51 ± 0,06
28 jours	46,23 ± 0,06

2.2. Additions minérales

Les additions que nous avons utilisées dans cette étude sont des éléments qui représentent des dimensions inférieurs à 80μm : La poudre de marbre, la poudre de verre et le laitier granulé .

2.2.1. Poudre de marbre

Pour la formulation de nos pâtes on a utilisé le déchet de marbre comme addition minérale. Ce déchet est récupéré d'une marbrerie de (Larbâa Nath Irathen), tizi ouzou. Le marbre est fourni sous forme d'une pâte mouillée, composée donc de poudre et d'eau.

La pâte est dans un premier temps séchée à une température 105 °C. Les mottes de marbre obtenues sont par la suite broyées pour disperser la poudre. La poudre grossière est concassée pour réduire son diamètre et optimiser la quantité à récupérer. Nous avons alors récupéré par tamisage les fines à diamètre inférieur à 80 μm.

D'après les travaux de Topçu et al [80] sur l'effet des PM sur les propriétés des BAP. Ces auteurs ont trouvé qu'une teneur en PM de 200 (kg /m³) est appropriée pour améliorer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Guneyisi et al [81] ont montré que l'introduction de PM dans les mortiers autoplacants par substitution partielle au ciment conduit vers

l'augmentation du temps d'écoulement et le temps du début et de fin de prise, tandis qu'elle diminue la résistance à la compression et la vitesse de propagation d'ondes. L'auteur [82] a affirmé que le remplacement de 5% du ciment par de PM améliore la résistance à la compression des bétons en raison de sa grande finesse. Aruntas et al [83] ont étudié la possibilité de produire des ciments composés contenant des déchets de marbre. Ces auteurs ont mentionné qu'il est possible de réduire le coût de production du ciment en utilisant 10% des déchets de marbre ([53]) .

Haddadou [53] a étudiée l'influence de la substitution de ciment par la poudre de marbre dans la formulation des BAP. Cet auteur a trouvée que l'incorporation de la poudre de marbre dans le mélange amélioré les propriétés rhéologiques du BAP.

Les caractéristiques de la poudre de marbre sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau 3.5. Caractéristiques physiques de la poudre de marbre

Couleur	Blanche
densité absolue	2,65 g/cm ³
densité apparente	0,90 g/cm ³
S.S.B	7312 cm ² /g

Tableau 3.6. Composition chimique de la poudre de marbre

Élément	%
SiO ₂	0,48
Al ₂ O ₃	0,10
Fe ₂ O ₃	0,12
CaO	55,17
MgO	0,72
SO ₃	0,46
K ₂ O	0,01
Na ₂ O	0,01
P ₂ O ₅	0,02
TiO ₂	0,01
P.A.F	43,53

Tableau 3.7. Composition minéralogique de la poudre de marbre

Minéraux	%
SiO ₂	1,5
CaCO ₃	95,5
CaMg(CO ₃) ₂	3



Figure 3.3 : La poudre de marbre

2.2.2. Poudre de verre (PV)

La poudre de verre est issue de la récupération des bouteilles en verre dans des décharges dispersées dans la nature. Cette poudre est obtenue par broyage des débris ramassés ; le broyage dure 4h du temps (au niveau du laboratoire de département Génie civil de l'université Sidi Ammar de ANNABA). La valorisation du verre de bouteilles dans les bétons autoplacants pourrait constituer une alternative intéressante, sur le plan environnemental, en évitant sa mise en décharge. Cependant, sur le plan technique les verres de bouteilles contiennent des quantités importantes d'alcalins pouvant entraîner des effets préjudiciables sur le béton en relation avec les réactions alcali-silice ou alcali-granulats.

Certains auteurs [84-85-86] déclarent que le verre entraîne un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzolanique s'il est utilisé sous forme de poudre fine.

Tableau 3.8. Composition chimique de la poudre de verre

Élément	%
SiO ₂	72,84
Al ₂ O ₃	0,98
Fe ₂ O ₃	0,55
CaO	9,66
MgO	1,76
SO ₃	0,25
K ₂ O	0,43
Na ₂ O	12,69
TiO ₂	0,016
P.A.F	0,79

Tableau 3.9. Caractéristiques physiques de la poudre de verre

Couleur	Blanc grisâtre
densité absolue	2,43 g/cm ³
densité apparente	1,22 g/cm ³
S.S.B	5500 cm ² /g



Figure 3.4 : La poudre de verre

2.2.3. Laitier granulé de haut fourneau (LG)

Le laitier granulé utilisé dans cette étude est produit par le complexe sidérurgique d'El-Hadjar. De structure vitreuse avec un taux de vitrification de 97% il présente un faible pouvoir hydraulique [87]. Son hydraulicité est le résultat d'un traitement par trempe à l'eau. Il se présente sous forme de grains sphériques, de couleur gris clair. Après séchage, le laitier granulé est broyé finement à une finesse supérieure à celle du ciment.

Tableau 3.10. Composition chimique de laitier granulé. [88]

Élément	%
SiO ₂	34,41
Al ₂ O ₃	8,17
Fe ₂ O ₃	4,15
CaO	40,69
MgO	4,56
SO ₃	0,36
K ₂ O	0,10
Na ₂ O	0,04
cl ⁻	0,01

Tableau 3.11. Caractéristiques physiques de laitier granulé

Couleur	gris clair
densité absolue	2,91 g/cm ³
densité apparente	1,22 g/cm ³
S.S.B	5539 cm ² /g

2.3. Superplastifiant

Le superplastifiant MEDAPLAST SP 40, c'est un superplastifiant haut réducteur d'eau, de type polynaphtalène sulfoné (PNS). Commercialisé par l'entreprise GRANITEX.

Tableau 3.12. Caractéristiques du MEDAPLAST SP 40

Forme	Liquide
Couleur	Marron
Densité	$1,20 \pm 0,01$
Extrait sec	40%
Teneur en chlore	$< 1\text{g/L}$
pH	8,2

2.4. Agent de viscosité

L'agent de viscosité utilisé c'est un Cimcil L25 sous forme liquide, la densité de $1,20\text{ g/cm}^3$, commercialisée par l'entreprise GRANITEX.

3. Méthodes de préparation des pâtes de ciment

Nous présentons dans le tableau suivant (tableau 3.13) la procédure expérimentale utilisée pour le malaxage de toutes les pâtes cimentaires. Les constituants, stockés à $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, sont préparés pour la réalisation de 1 litre de mélange. La durée totale de la procédure est de 5 minutes.

Tableau 3.13. Procédure de malaxage des pâtes de ciment [89]

Instant	Etape	Durée - Vitesse
—	Ajout E, AV et 1/3 SP	30 s – petite vitesse
T_0	Ajout ciment	30 s – petite vitesse
$T_0 + 30\text{ s}$	Ajout addition	30 s – petite vitesse
$T_0 + 60\text{ s}$	Passage à grande vitesse	30 s – grande vitesse
$T_0 + 90\text{ s}$	Arrêt et raclage du bol	30 s – arrêt
$T_0 + 120\text{ s}$	Reprise du malaxage	60 s – grande vitesse
$T_0 + 180\text{ s}$	Ajout 2/3 SP	15 s – petite vitesse
$T_0 + 195\text{ s}$	Passage à grande vitesse	105 s – grande vitesse
$T_0 + 300\text{ s}$	Fin du malaxage	—

4. Consistance de la pâte de ciment : aspect visuel

Une observation visuelle est effectuée sur tous les mélanges ainsi qu'une inspection manuelle avec la truelle, destinées à noter l'aspect de la pâte. Nous avons rejeté tous les mélanges qui présentent une sédimentation. En effet, les mesures rhéologiques ne sont plus représentatives à cause de l'hétérogénéité de tels mélanges, la sédimentation peut être observée lors de l'essai du mini-cône par un halo de laitance en périphérie de la galette. La

sédimentation peut également être observée en versant le mélange dans un bol: une partie très concentrée peut se décanter à la partie inférieure du mélange, et une phase liquide blanchâtre peut surnager le mélange.

Nous avons défini trois types de consistance de la pâte de ciment : fluide, plastique et ferme.

Un aspect fluide: est noté lorsque le mélange présente les caractéristiques d'un corps fluide, homogène et qui se remet en place très vite après le passage de mini-cône.

Un aspect plastique: est noté lorsque le mélange présente les caractéristiques d'un corps moins fluide, homogène et qui se remet en place lentement après le passage de mini-cône.

Un aspect ferme: est noté lorsque le mélange ne s'écoule pas d'une façon continue (mais d'un seul bloc). Le passage de mini-cône est difficile à cause de la forte consistance de ce type de mélange. (Figure 3.5).



la pâte fluide

la pâte plastique

la pâte ferme

Figure 3.5 : Appréciation visuelle de la consistance d'une pâte

5. Formulations étudiées

Les différentes compositions testées sont formulées à masses constantes. Le superplastifiant et l'agent de viscosité sont exprimés en pourcentage de la masse du ciment. Les compositions testées sont récapitulées sous forme de groupes avec à chaque fois un ou deux composants qui varient.

Abréviations : SP : dosage en superplastifiant ; AV : dosage en agent de viscosité ; E : eau ; C : ciment ; PM : poudre de marbre ; PV : poudre de verre ; LG : laitier granulé.

Les formules sont récapitulées sous forme de groupes :

- Groupes (1, 2 et 3) formulés de C + E + PM avec pour le Groupe 1 $[E/(C+PM) = 0,40]$, le Groupe 2 $[E/(C+PM) = 0,45]$ et le Groupe 3 $[E/(C+PM) = 0,50]$. Pour ces trois groupes nous avons (C/PM) variable puis le SP variable.

Dans ce cas, pour une composition à $E/(C+PM)$ fixé à 0,40 ; on substitue alors la masse du ciment par de la PM de 0 PM à $C/PM = 1$; et pour chaque valeur de C/PM fixée on fait varier le SP. Cette explication est valable pour ces trois groupes.

- Groupes (4, 5 et 6) formulés de C + E + PM avec pour le Groupe 4 $[E/(C+PM) = 0,40]$, le Groupe 5 $[E/(C+PM) = 0,45]$ et le Groupe 6 $[E/(C+PM) = 0,50]$. Pour ces trois groupes nous avons $(C/PM) = 2$, le SP variable puis le AV variable.

Dans ce cas, pour une composition à $E/(C+PM)$ fixé à 0,40, C/PM est fixé à 2; et pour chaque valeur de AV fixée on fait varier le SP. Cette explication est valable pour ces trois groupes.

- Groupes (7, 8 et 9) formulés de C + E + PV avec pour le Groupe 7 $[E/(C+PV) = 0,40]$, le Groupe 8 $[E/(C+PV) = 0,45]$ et le Groupe 9 $[E/(C+PV) = 0,50]$. Pour ces trois groupes nous avons (C/PV) variable puis le SP variable.

Dans ce cas, pour une composition à $E/(C+PV)$ fixé à 0,40 ; on substitue alors la masse du ciment par de la PV de 0 PV à $C/PV = 1$; et pour chaque valeur de C/PV fixée on fait varier le SP. Cette explication est valable pour ces trois groupes.

- Groupes (10, 11 et 12) formulés de C + E + PV avec pour le Groupe 10 $[E/(C+PV) = 0,40]$, le Groupe 11 $[E/(C+PV) = 0,45]$ et le Groupe 12 $[E/(C+PV) = 0,50]$. Pour ces trois groupes nous avons $(C/PV) = 2$, le SP variable puis le AV variable.

Dans ce cas, pour une composition à $E/(C+PV)$ fixé à 0,40, C/PV est fixé à 2; et pour chaque valeur de AV fixée on fait varier le SP. Cette explication est valable pour ces trois groupes.

- Groupes (13, 14 et 15) formulés de C + E + LG avec pour le Groupe 13 $[E/(C+LG) = 0,40]$, le Groupe 14 $[E/(C+LG) = 0,45]$ et le Groupe 15 $[E/(C+LG) = 0,50]$. Pour ces trois groupes nous avons (C/LG) variable puis le SP variable.

Dans ce cas, pour une composition à $E/(C+LG)$ fixé à 0,40 ; on substitue alors la masse du ciment par de la LG de 0 LG à $C/LG = 1$; et pour chaque valeur de C/LG fixée on fait varier le SP. Cette explication est valable pour ces trois groupes.

- Groupes (16, 17 et 18) formulés de C + E + LG avec pour le Groupe 16 $[E/(C+LG) = 0,40]$, le Groupe 17 $[E/(C+LG) = 0,45]$ et le Groupe 18 $[E/(C+LG) = 0,50]$. Pour ces trois groupes nous avons $(C/LG) = 2$, le SP variable puis le AV variable.

Dans ce cas, pour une composition à $E/(C+LG)$ fixé à 0,40, C/LG est fixé à 2; et pour chaque valeur de AV fixée on fait varier le SP. Cette explication est valable pour ces trois groupes.

Groupe	$E/(C+PM)$	C/PM	SP (%)	AV (%)
1	0.40	1 à 2	Variable	0
2	0.45	1 à 2	Variable	0
3	0.50	1 à 2	Variable	0
4	0.40	2	Variable	Variable
5	0.45	2	Variable	Variable
6	0.50	2	Variable	Variable

Groupe	$E/(C+PV)$	C/PV	SP (%)	AV (%)
7	0.40	1 à 2	Variable	0
8	0.45	1 à 2	Variable	0
9	0.50	1 à 2	Variable	0
10	0.40	2	Variable	Variable
11	0.45	2	Variable	Variable
12	0.50	2	Variable	Variable

Groupe	$E/(C+LG)$	C/LG	SP (%)	VA (%)
13	0.40	1 à 2	Variable	0
14	0.45	1 à 2	Variable	0
15	0.50	1 à 2	Variable	0
16	0.40	2	Variable	Variable
17	0.45	2	Variable	Variable
18	0.50	2	Variable	Variable

6. Résultats et Discussions

6.1. Résultats au mini cône

Pour la caractérisation de la pâte autoplacante à l'état frais, un mini-cône tronconique creux, servira essentiellement pour la détermination des diamètres d'étalement sur une plaque de

verre horizontale en fonction des paramètres de composition, ces diamètres sont mesurés après 1 minute d'étalement.



Figure 3.6 : Essai d'étalement au mini-cône

Les dimensions du mini-cône sont : 40 mm de hauteur, 70 mm de diamètre supérieur et 80 mm de diamètre inférieur. Le cône est placé au centre d'une plaque en verre puis rempli de pâte. Le mini-cône est ensuite soulevé pour laisser la pâte s'écouler. Deux mesures d'étalement sont effectuées perpendiculairement.

6.1.1. Influence du dosage en SP sur l'étalement au mini cône

Nous présentons les résultats des essais au mini-cône effectués sur les différentes compositions. L'analyse des résultats conduit à comprendre l'effet combiné des deux paramètres : dosage de superplastifiant et la poudre de marbre sur l'écoulement des pâtes autoplacantes.

Les figures 7a, 7b et 7c correspondent aux résultats d'étalement en fonction de la variation du dosage en SP et du rapport C/PM soit donc la quantité de PM dans les pâtes formulées aux mêmes rapports : $E/(C+PM) = 0,40$ pour la figure 7a, $E/(C+PM) = 0,45$ pour la 7b et $E/(C+PM) = 0,50$ pour la 7c.

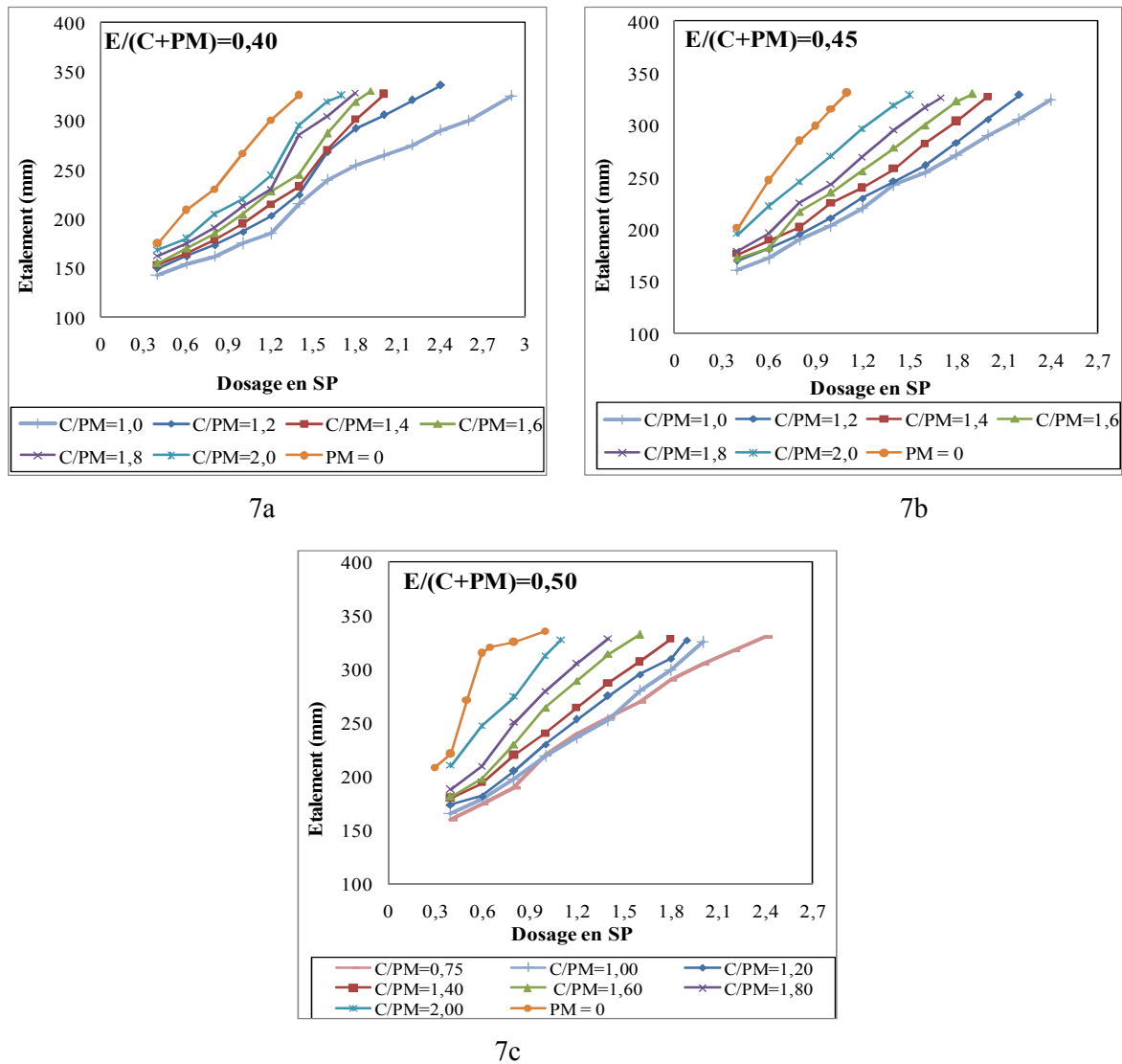


Figure 3.7 : Évolution de l'étalement en fonction de SP et de C/PM des pâtes des groupes 1, 2 et 3

La première remarque que l'on peut apporter à ces pâtes de béton est que sur l'ensemble des essais menés pour tous les mélanges, l'étalement pour une composition donnée, mêmes rapports $E/(C+PM)$ et C/PM , augmente avec l'augmentation du SP.

La deuxième remarque est que sur l'ensemble des essais menés sur tous les mélanges, (pour le rapport $E/(C+PM)$ fixé par exemple à 0,40 et pour un SP fixé), l'étalement diminue avec l'augmentation de la quantité de la poudre de marbre dans la pâte est donc avec le C/PM qui diminue. Autrement dit, pour un même dosage en SP, moins on met de poudre de marbre dans la composition plus la pâte s'étale.

6.1.2. Influence du dosage de la poudre de marbre sur l'étalement au mini cône

Sur la figure 3.8 nous avons représenté les résultats d'étalement obtenus pour les pâtes formulées au même rapport ($E/(C+PM) = 0,40$) et un dosage en SP fixé à 1 % du poids de ciment avec un rapport C/PM variable.

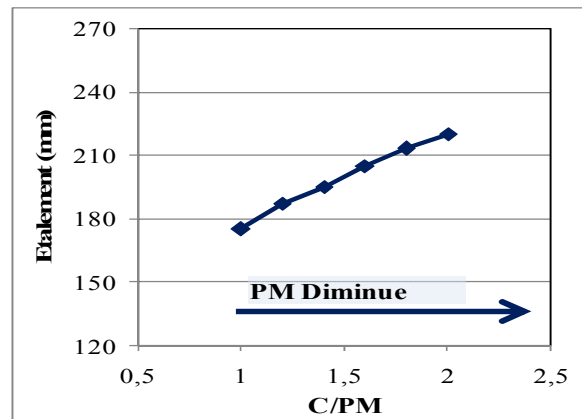


Figure 3.8 : Évolution de l'étalement en fonction de C/PM pour un SP fixé à 1 % (cas où $E/(C+PM) = 0,40$)

La figure montre l'augmentation de l'étalement de la valeur de 175 mm avec un rapport de C/PM = 1 à 220 mm pour un rapport de C/PM = 2.

Ainsi, la substitution du ciment par la poudre de marbre a un effet inversement proportionnel sur l'étalement de la pâte, cela on maintenant le SP fixé par rapport au poids du ciment. Dans ce cas pour fluidifier la pâte, on sera obligé de compenser la perte en fluidité due à la présence de la PM en augmentant le dosage en SP.

Sur la figure 3.9 suivante, nous avons représenté la variation de l'étalement en fonction du rapport C/PM pour un dosage en SP fixé à 1 % cela pour les pâtes formulées à différents rapports $E/(C+PM)$.

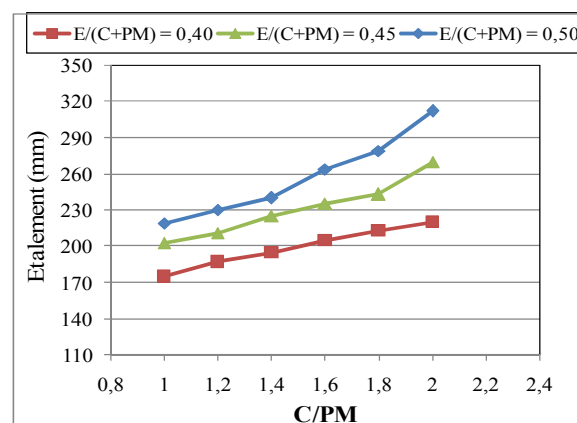


Figure 3.9 : Évolution de l'étalement en fonction de C/PM pour un SP fixé à 1 % et $E/(C+PM)$ variable

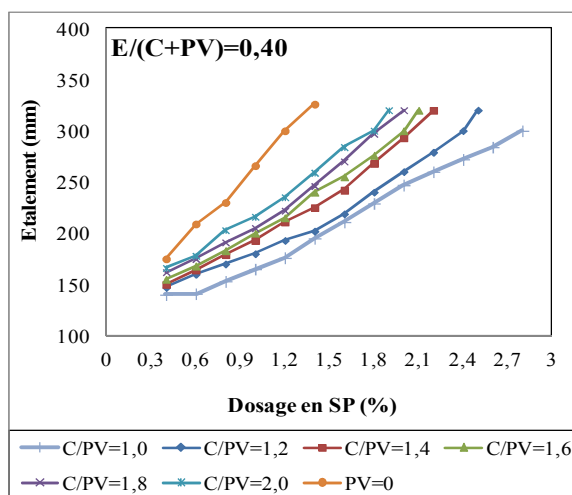
Cette diminution d'étalement peut être s'expliquée par le besoin important en eau et la grande surface spécifique de la poudre de marbre.

Avec l'augmentation de la finesse, la surface de mouillage des particules de l'addition augmente induisant ainsi une plus grande quantité d'eau qui est adsorbée par la surface des particules de l'addition et pour remplir les vides interparticules. En plus de leur distribution granulométrique, les propriétés de mouillabilité des poudres ainsi que leur charge de surface peuvent également affecter la demande en eau [90,91].

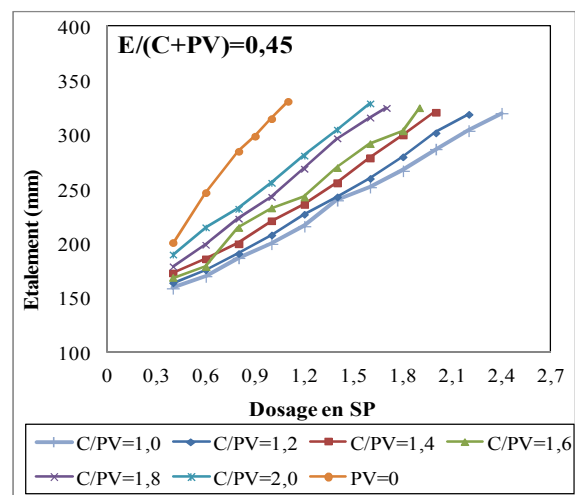
6.1.3. Influence du dosage de la poudre de verre sur l'étalement au mini cône

Nous présentons les résultats des essais au mini-cône effectués sur les différentes compositions. L'analyse des résultats conduit à comprendre l'effet combiné des deux paramètres : dosage de superplastifiant et la poudre de verre sur l'écoulement des pâtes autoplâçantes.

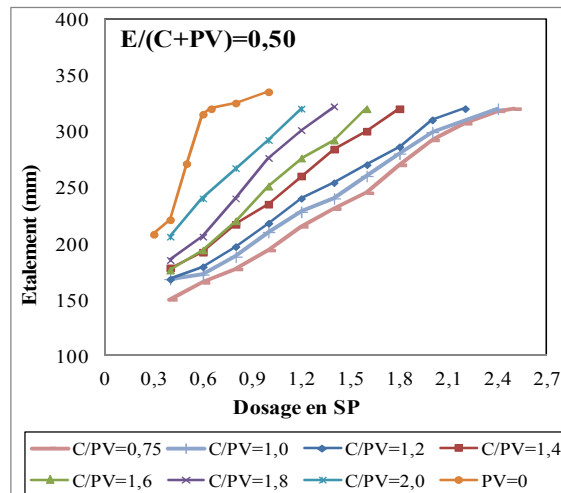
Les figure 10a, 10b et 10c correspondent aux résultats d'étalement en fonction de la variation du dosage en SP et du rapport C/PV soit donc la quantité de PV dans les pâtes formulées aux mêmes rapports : $E/(C+PV) = 0,40$ pour la figure 10a, $E/(C+PV) = 0,45$ pour la 10b et $E/(C+PV) = 0,50$ pour la 10c.



10a



10b



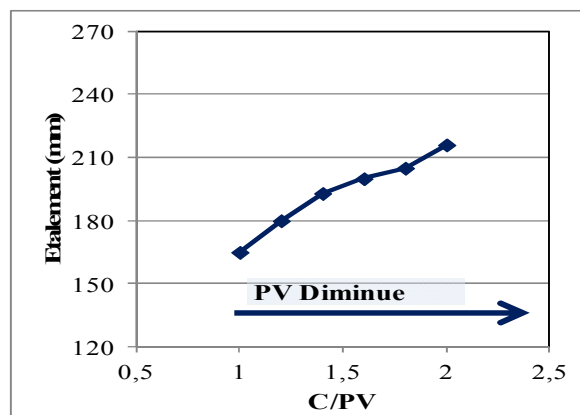
10c

Figure 3.10 : Évolution de l'étalement en fonction de SP et de C/PV des pâtes des groupes 7, 8 et 9

La première remarque que l'on peut apporter à ces pâtes de béton est que sur l'ensemble des essais menés pour tous les mélanges, l'étalement pour une composition donnée, mêmes rapports $E/(C+PV)$ et C/PV , augmente avec l'augmentation du SP.

La deuxième remarque est que sur l'ensemble des essais menés sur tous les mélanges, (pour le rapport $E/(C+PV)$ fixé par exemple à 0,40 et pour un SP fixé), l'étalement diminue avec l'augmentation de la quantité de la poudre de verre dans la pâte est donc avec le C/PV qui diminue. Autrement dit, pour un même dosage en SP, moins on met de poudre de verre dans la composition plus la pâte s'étale.

Sur la figure 3.11 nous avons représenté les résultats d'étalement obtenus pour les pâtes formulées au même rapport ($E/(C+PV) = 0,40$) et un dosage en SP fixé à 1 % du poids de ciment avec un rapport C/PV variable.

Figure 3.11 : Évolution de l'étalement en fonction de C/PV pour un SP fixé à 1 % (cas où $E/(C+PV) = 0,40$)

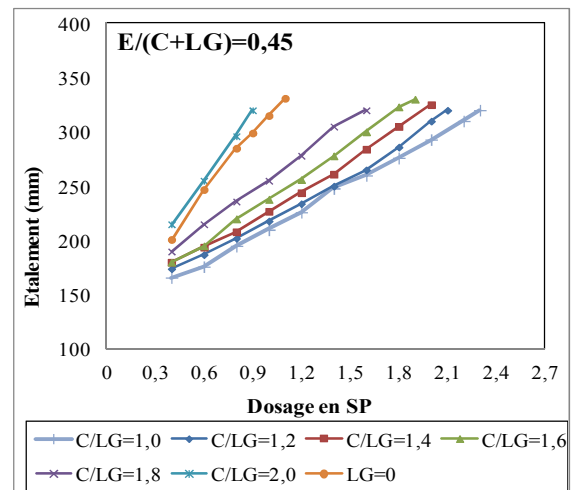
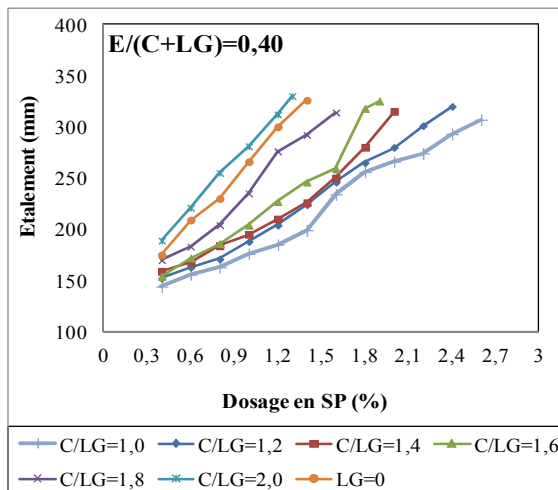
La figure montre l'augmentation de l'étalement de la valeur de 165 mm avec un rapport de $C/PV = 1$ à 216 mm pour un rapport de $C/PV = 2$.

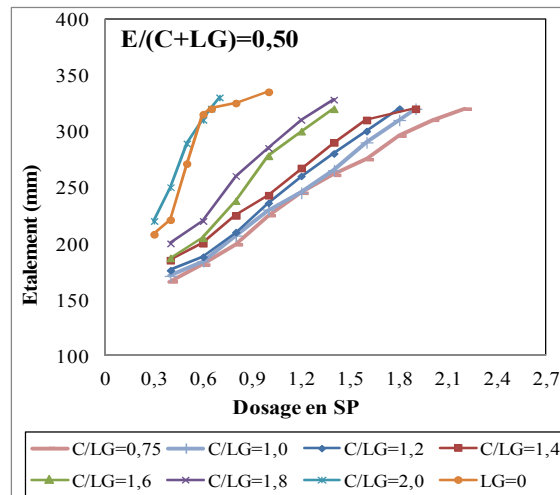
Ainsi, la substitution du ciment par la poudre de verre a un effet inversement proportionnel sur l'étalement de la pâte, cela on maintenant le SP fixé par rapport au poids du ciment. Dans ces cas pour fluidifier la pâte, on sera obligé de compenser la perte en fluidité due à la présence de la PV en augmentant le dosage en SP.

6.1.4. Influence du dosage de laitier granulé sur l'étalement au mini cône

Nous présentons les résultats des essais au mini-cône effectués sur les différentes compositions. L'analyse des résultats conduit à comprendre l'effet combiné des deux paramètres : dosage de superplastifiant et de laitier granulé sur l'écoulement des pâtes autoplâçantes.

Les figure 12a, 12b et 12c correspondent aux résultats d'étalement en fonction de la variation du dosage en SP et du rapport C/LG soit donc la quantité de LG dans les pâtes formulées aux mêmes rapports : $E/(C+LG) = 0,40$ pour la figure 12a, $E/(C+LG) = 0,45$ pour la 12b et $E/(C+LG) = 0,50$ pour la 12c.





12c

Figure 3.12 : Évolution de l'étalement en fonction de SP et de C/PV des pâtes des groupes 13, 14 et 15

La première remarque que l'on peut apporter à ces pâtes de béton est que sur l'ensemble des essais menés pour tous les mélanges, l'étalement pour une composition donnée, mêmes rapports $E/(C+LG)$ et C/LG , augmente avec l'augmentation du SP.

La deuxième remarque est que sur l'ensemble des essais menés sur tous les mélanges, (pour le rapport $E/(C+LG)$ fixé par exemple à 0,40 et pour un SP fixé) :

Pour un faible dosage de laitier granulé ($C/LG = 2$), l'étalement de ces pâtes est supérieure à celle de la pâte de ciment ($LG = 0$). Tandis que pour des dosages supérieurs, la substitution de laitier granulé provoque une diminution de l'étalement des mélanges.

Sur la figure 3.13 nous avons représenté les résultats d'étalement obtenus pour les pâtes formulées au même rapport ($E/(C+LG) = 0,40$) et un dosage en SP fixé à 1 % du poids de ciment avec un rapport C/LG variable.

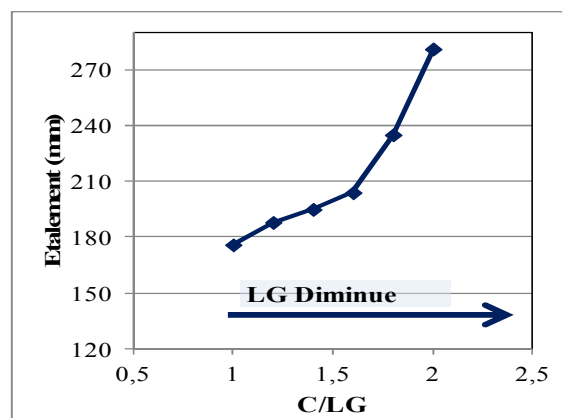


Figure 3.13 : Évolution de l'étalement en fonction de C/LG pour un SP fixé à 1 % (cas où $E/(C+LG) = 0,40$)

La figure montre l'augmentation de l'étalement de la valeur de 176 mm avec un rapport de C/ LG = 1 à 281 mm pour un rapport de C/ LG = 2.

6.1.5. Influence du dosage de l'agent de viscosité sur l'étalement au mini cône

Parce que les résultats obtenus sur le groupe 6 sont ressemblants à ceux obtenus sur les groupes 4 et 5, sur les figures 14a, 14b sont représentés les résultats d'étalement en fonction de la variation de SP et de AV, le rapport C/PM est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport : $E/(C+PM) = 0,40$ pour la figure 14a, $E/(C+PM) = 0,45$ pour la 14b.

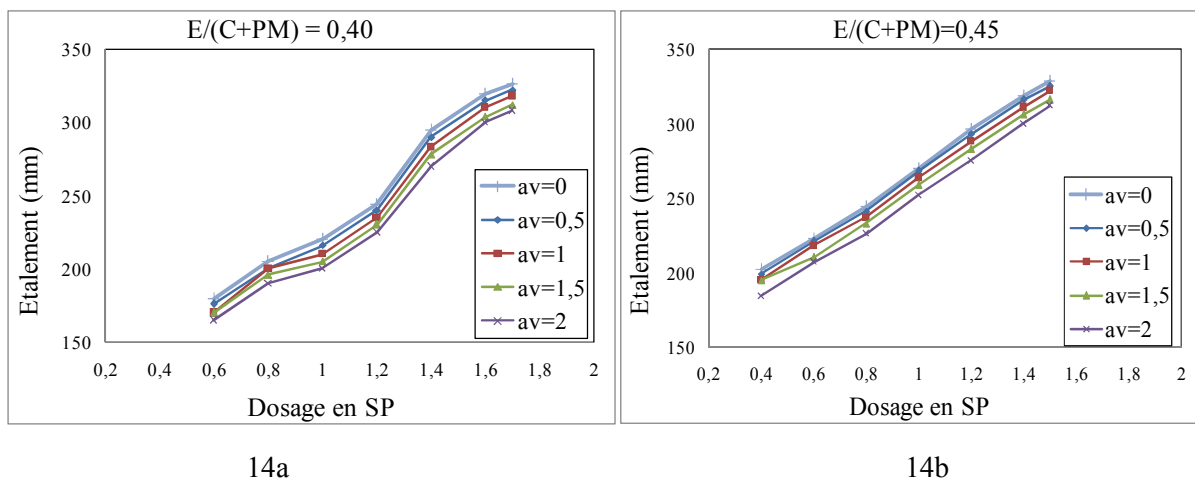


Figure 3.14 : Évolution de l'étalement en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 4 et 5

Parce que les résultats obtenus sur le groupe 12 sont ressemblants à ceux obtenus sur les groupes 10 et 11, sur les figures 15a, 15b sont représentés les résultats d'étalement en fonction de la variation de SP et de AV, le rapport C/PV est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport : $E/(C+PV) = 0,40$ pour la figure 15a, $E/(C+PV) = 0,45$ pour la 15b.

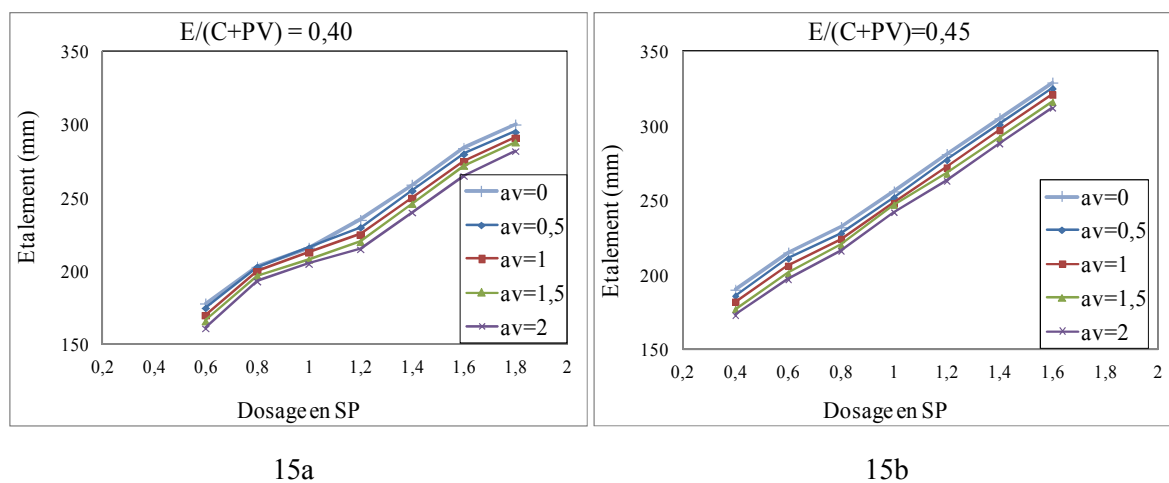


Figure 3.15 : Évolution de l'étalement en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 10 et 11

Parce que les résultats obtenus sur le groupe 18 sont ressemblants à ceux obtenus sur les groupes 16 et 17, sur les figures 16a, 16b sont représentés les résultats d'étalement en fonction de la variation de SP et de AV, le rapport C/LG est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport : $E/(C+LG) = 0,40$ pour la figure 16a, $E/(C+LG) = 0,45$ pour la 16b.

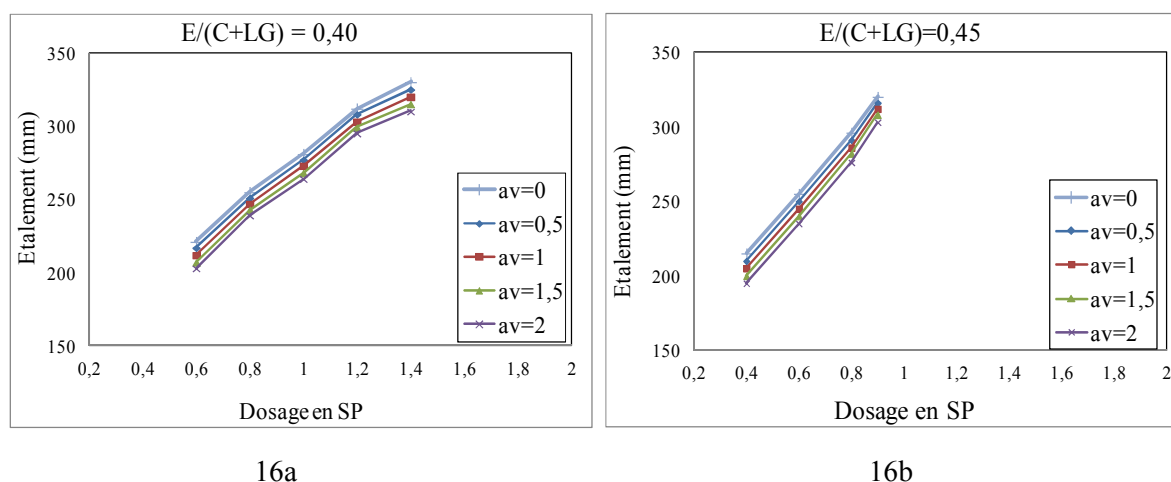


Figure 3.16 : Évolution de l'étalement en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 16 et 17. L'influence de l'agent de viscosité sur l'étalement au mini cône est présentée sur les figures 3.14 ; 15 et 16. Les résultats montrent que l'introduction de l'agent de viscosité dans les différentes compositions n'a pas une grande influence sur les mesures d'étalement. En effet, sur les neuf groupes de pâtes étudiés la différence d'étalement entre les pâtes formulées à 0 % de AV et les pâtes formulées à 2 % de AV l'étalement a diminué en moyenne de 18 mm.

Quand au superplastifiant, son action n'est pas influencée par la présence de l'agent de viscosité car l'étalement évolue de la même manière, avec les mêmes écarts, entre les pâtes avec des AV différents. Cela démontre qu'il n'y a pas eu d'interaction chimique entre les deux adjuvants.

6.2. Résultats au cône de Marsh

Nous avons réalisé un essai au cône de Marsh, qui relie une consistance à un temps d'écoulement pour différents dosages en adjuvant exprimé en pourcentage par rapport à la masse du ciment.



Figure 3.17 : Essai d'écoulement au cône de Marsh

L'essai consiste à mesurer le temps qu'il faut pour vider un cône contenant 1 litre de pâte à travers un orifice d'évacuation de 4 mm de diamètre. On commence par fermer l'orifice d'évacuation inférieur et on verse 1 litre de pâte dans le cône. On démarre le chronomètre au moment où on libère l'orifice. On arrête le chronomètre dès que le litre de pâte s'est déversé dans un cylindre gradué que l'on place sous l'orifice du cône. Le temps d'écoulement que l'on mesure permet d'évaluer la fluidité de la pâte.

6.2.1. Influence du dosage en SP sur le temps d'écoulement au cône de Marsh

Nous présentons les résultats des essais au cône de Marsh effectués sur les différentes compositions. L'analyse des résultats conduit à comprendre l'effet combiné des deux paramètres : dosage de superplastifiant et de la poudre de marbre sur l'écoulement des pâtes autoplacantes.

Les figures 18a, 18b et 18c correspondent aux résultats d'écoulement en fonction de la variation du dosage en SP et du rapport C/PM soit donc la quantité de PM dans les pâtes formulées aux mêmes rapports : $E/(C+PM) = 0,40$ pour la figure 18a, $E/(C+PM) = 0,45$ pour la 18b et $E/(C+PM) = 0,50$ pour la 18c.

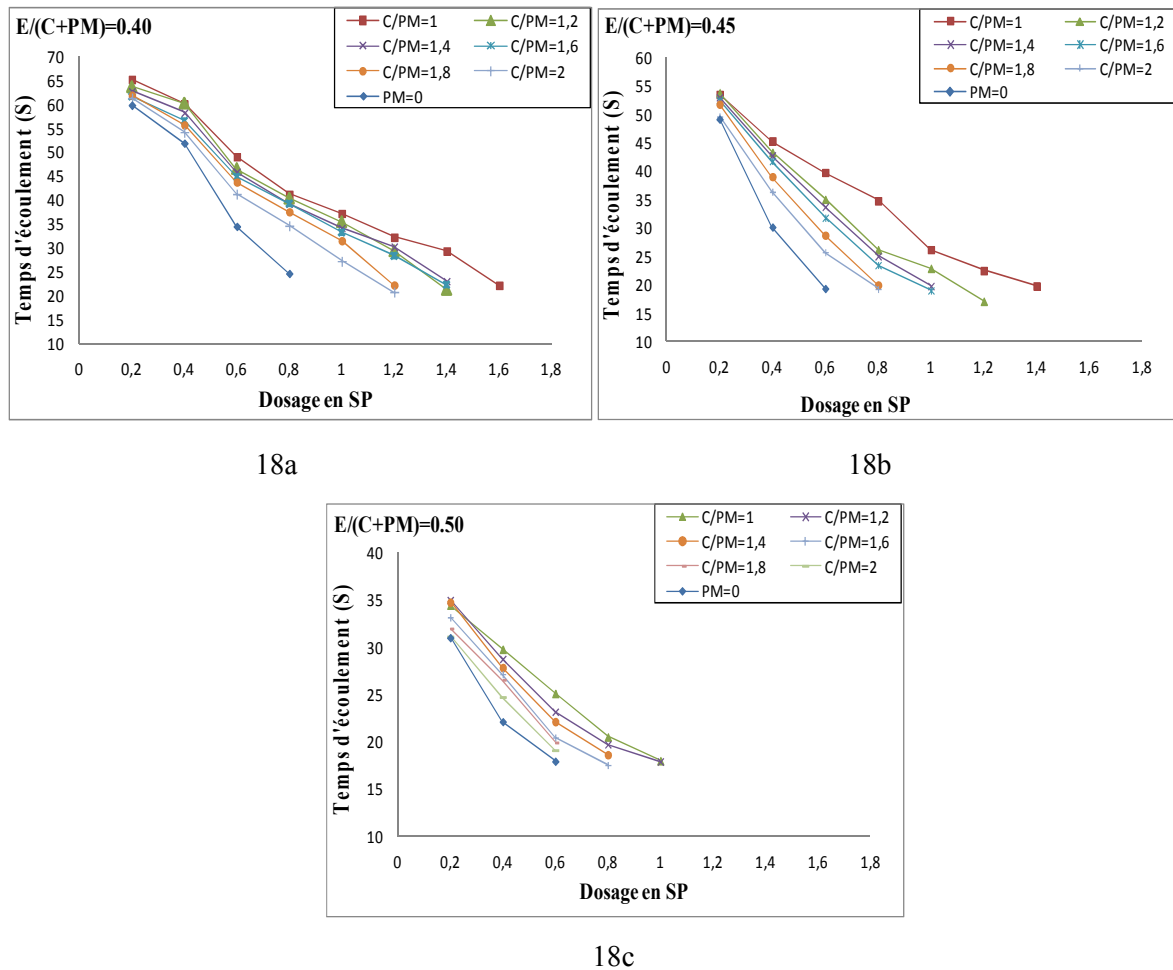


Figure 3.18 : Évolution du temps d'écoulement en fonction de SP et de C/PM des pâtes des groupes 1, 2 et 3

La première remarque que l'on peut apporter à ces pâtes de béton est que sur l'ensemble des essais menés pour tous les mélanges, le temps d'écoulement pour une composition donnée, mêmes rapports $E/(C+PM)$ et C/PM , diminue avec l'augmentation du SP.

La deuxième remarque est que sur l'ensemble des essais menés sur tous les mélanges, (pour le rapport $E/(C+PM)$ fixé par exemple à 0,40 et pour un SP fixé), le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation de la quantité de la poudre de marbre dans la pâte est donc avec le C/PM qui diminue. Autrement dit, pour un même dosage en SP, moins on met de poudre de marbre dans la composition plus la pâte s'écoule rapidement.

6.2.2. Influence du dosage de PM sur le temps d'écoulement au cône de Marsh

Sur la figure 3.19 nous avons représenté les résultats du temps d'écoulement obtenus pour les pâtes formulées au même rapport ($E/(C+PM) = 0,40$) et un dosage en SP fixé à 1 % du poids de ciment avec un rapport C/PM variable.

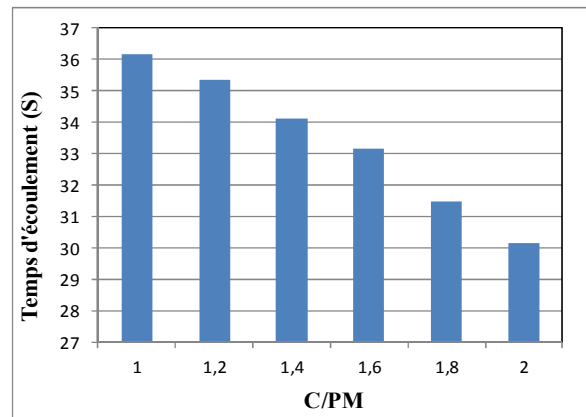


Figure 3.19 : Évolution du temps d'écoulement en fonction de C/PM pour un SP fixé à 1 % (cas ou $E/(C+PM) = 0,40$)

La figure montre la diminution du temps d'écoulement mesuré de la valeur de 36,15 S avec un rapport de C/PM = 1 (C égal à PM) à 30,17 S pour un rapport de C/PM = 2 (C égal au double de PM).

Ainsi, la substitution du ciment par la poudre de marbre a un effet inversement proportionnel sur l'écoulement de la pâte, cela on maintenant le SP fixé par rapport au poids du ciment. Dans ce cas pour fluidifier la pâte, on sera obligé de compenser la perte en fluidité due à la présence de la PM en augmentant le dosage en SP.

Sur la figure 3.20 suivante, nous avons représenté les résultats de mesure du temps d'écoulement en fonction du rapport C/PM pour un dosage en SP fixé à 0,6 % cela pour les pâtes formulées à différents rapports $E/(C+PM)$.

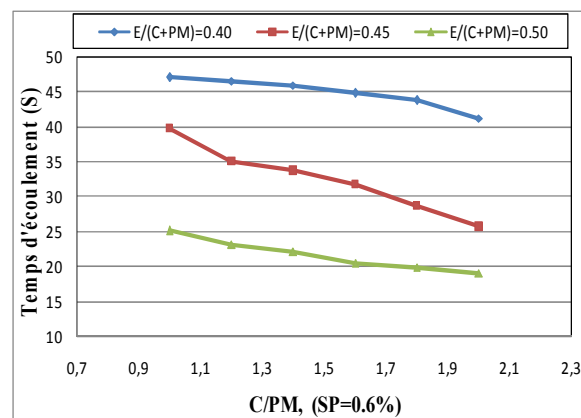


Figure 3.20 : Évolution du temps d'écoulement en fonction de C/PM pour un SP fixé à 0,6 % et $E/(C+PM)$ variable

Certainement, les temps d'écoulement diminuent avec l'augmentation du rapport ($E/(C+PM)$) soit donc avec la quantité d'eau.

6.2.3. Influence du dosage du PV sur le temps d'écoulement au cône de Marsh

Nous présentons les résultats des essais au cône de Marsh effectués sur les différentes compositions. L'analyse des résultats conduit à comprendre l'effet combiné des deux paramètres : dosage de superplastifiant et de la poudre de verre sur l'écoulement des pâtes autoplâçantes.

Les figure 21a, 21b et 21c correspondent aux résultats d'écoulement en fonction de la variation du dosage en SP et du rapport C/PV soit donc la quantité de PV dans les pâtes formulées aux mêmes rapports : $E/(C+PV)=0,40$ pour la figure 21a, $E/(C+PV)=0,45$ pour la 21b et $E/(C+PV)=0,50$ pour la 21c.

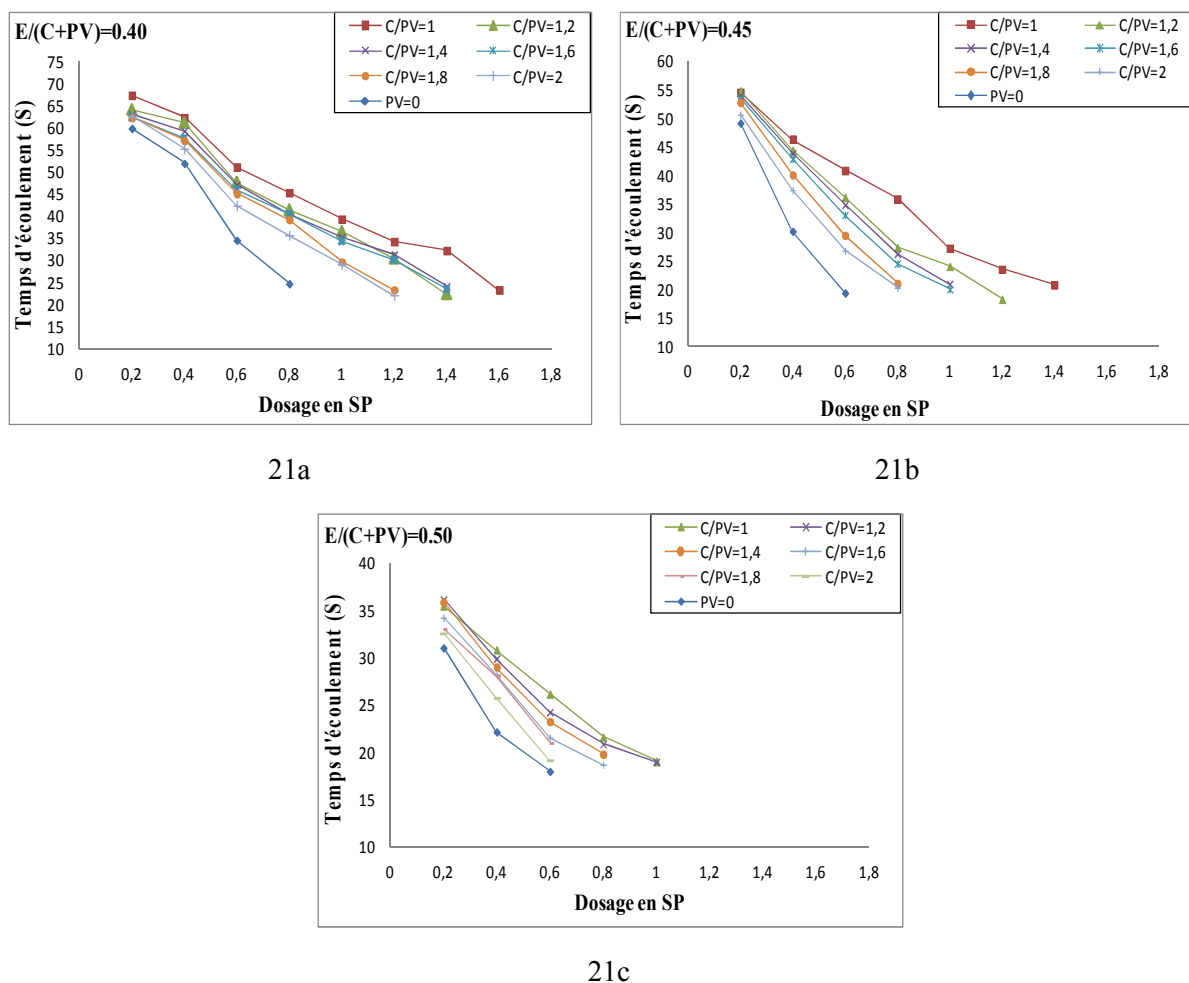


Figure 3.21 : Évolution du temps d'écoulement en fonction de SP et de C/PV des pâtes des groupes 7, 8 et 9

La première remarque que l'on peut apporter à ces pâtes de béton est que sur l'ensemble des essais menés pour tous les mélanges, le temps d'écoulement pour une composition donnée, mêmes rapports $E/(C+PV)$ et C/PV, diminue avec l'augmentation du SP.

La deuxième remarque est que sur l'ensemble des essais menés sur tous les mélanges, (pour le rapport $E/(C+PV)$ fixé par exemple à 0,40 et pour un SP fixé), le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation de la quantité de la poudre de verre dans la pâte est donc avec le C/PV qui diminue. Autrement dit, pour un même dosage en SP, moins on met de poudre de verre dans la composition plus la pâte s'écoule rapidement.

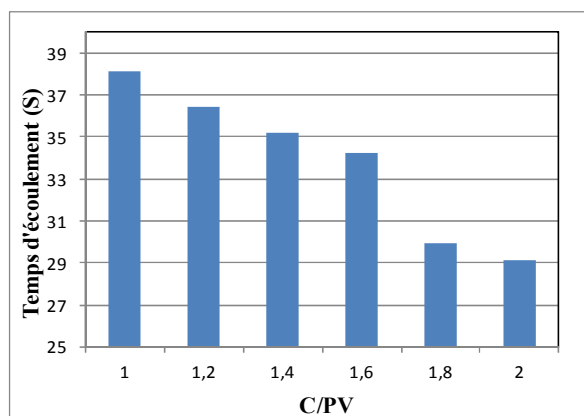


Figure 3.22 : Évolution du temps d'écoulement en fonction de C/PV pour un SP fixé à 1 % (cas ou $E/(C+PV) = 0,40$)

On peut clairement remarquer que le temps d'écoulement au cône de Marsh est d'autant plus élevé que le dosage en poudre de verre augmente. Pour un rapport $C/PV = 1$ (C égal à PV), une augmentation du temps d'écoulement d'environ 24 % est enregistrée par rapport le mélange de $C/PV = 2$ (C égal au double de PV).

6.2.4. Influence du dosage de LG sur le temps d'écoulement au cône de Marsh

Nous présentons les résultats des essais au cône de Marsh effectués sur les différentes compositions. L'analyse des résultats conduit à comprendre l'effet combiné des deux paramètres : dosage de superplastifiant et de laitier granulé sur l'écoulement des pâtes autoplçantes.

Les figure 23a, 23b et 23c correspondent aux résultats d'écoulement en fonction de la variation du dosage en SP et du rapport C/LG soit donc la quantité de LG dans les pâtes formulées aux mêmes rapports : $E/(C+LG) = 0,40$ pour la figure 23a, $E/(C+LG) = 0,45$ pour la 23b et $E/(C+LG) = 0,50$ pour la 23c.

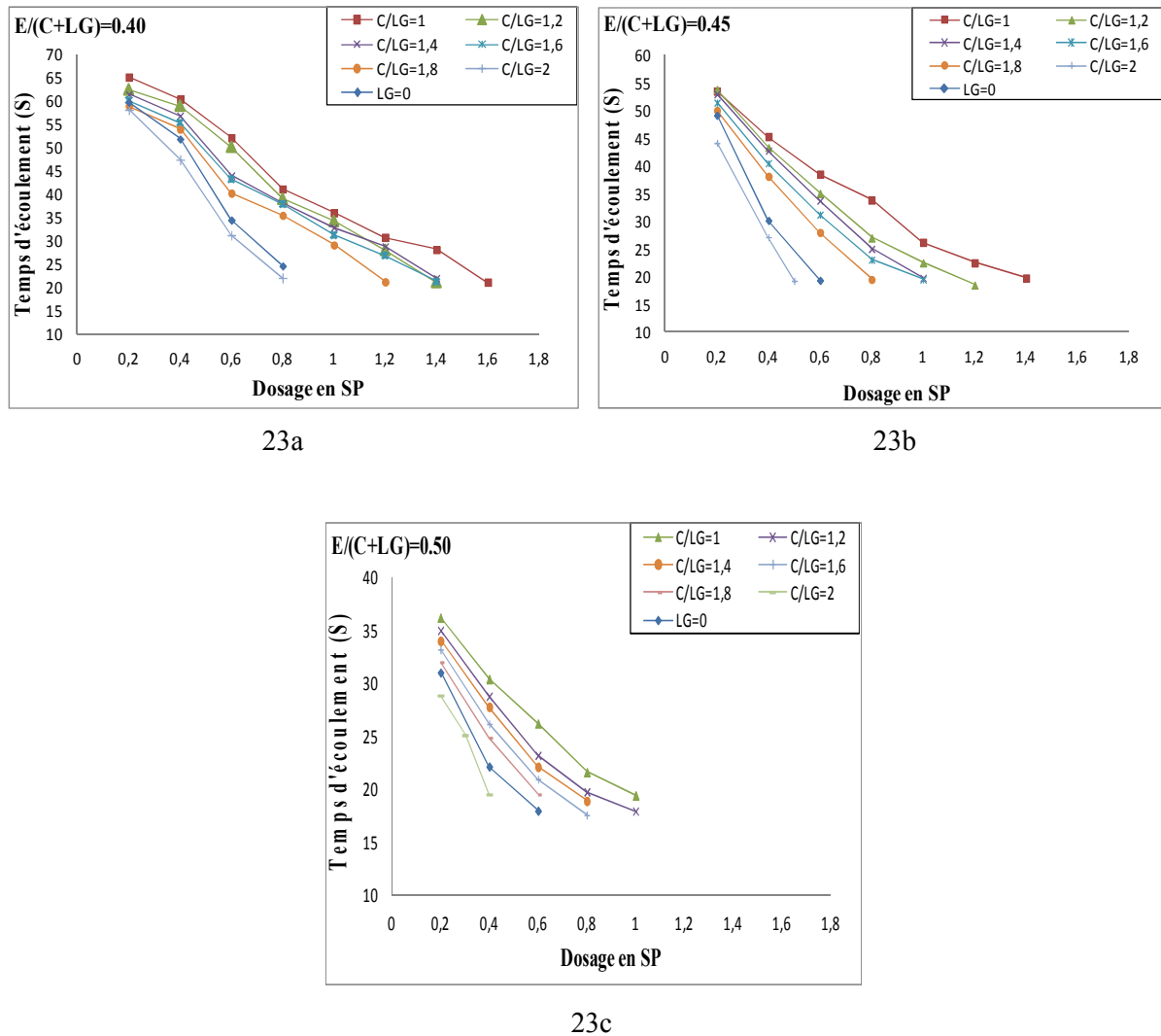


Figure 3.23 : Évolution du temps d'écoulement en fonction de SP et de C/LG des pâtes des groupes 13, 14 et 15

La première remarque que l'on peut apporter à ces pâtes de béton est que sur l'ensemble des essais menés pour tous les mélanges, le temps d'écoulement pour une composition donnée, mêmes rapports $E/(C+LG)$ et C/LG , diminue avec l'augmentation du SP.

La deuxième remarque est que sur l'ensemble des essais menés sur tous les mélanges, l'ajout du LG pour un rapport $C/LG = 2$, réduit le temps d'écoulement et augmenté la fluidité des mélanges, au-delà duquel l'effet inverse se produit.

Les résultats présentés sur les figures 3.18; 21 et 23 montrent que l'augmentation du dosage en fine accroît la demande en superplastifiant des mélanges quel que soit le type de l'addition minérale. Les auteurs [92] mentionnent que les additions minérales consomment une part non négligeable de superplastifiant, variable selon leurs natures. De ce fait, la quantité de superplastifiant destinée à la défloculation et à la dispersion des grains de ciment

sera mobilisée en partie par des additions minérales, réduisant ainsi la rhéologie du mélange si on ne tient pas compte de la demande en superplastifiant de l'addition. Autrement dit, plus le dosage en addition augmente plus leur demande en superplastifiant augmente.

Le dosage de saturation

Sur la figure 3.24 nous avons représenté les résultats du dosage de saturation obtenus pour les pâtes formulées au même rapport ($E/(C+A) = 0,40$) avec un rapport C/A variable (A : addition minérale).

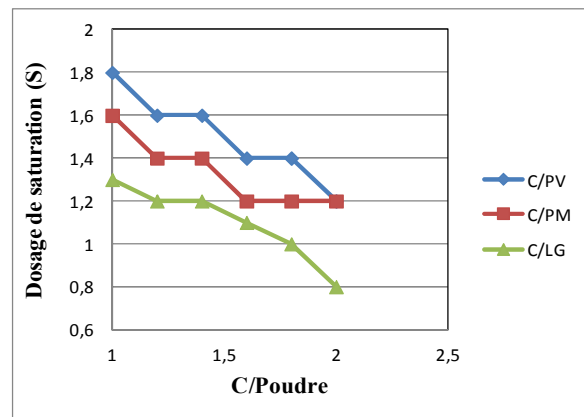


Figure 3.24 : Effet du dosage en additions minérales sur la demande en superplastifiant des mélanges cimentaires

Par définition, le point de saturation est le point au-delà duquel toute augmentation du dosage en superplastifiant ne contribue pas à l'amélioration de la rhéologie du mélange cimentaire [93]. Le dosage à saturation d'un mélange cimentaire peut dépendre fortement de la nature et du dosage de l'addition qui le compose. De plus, certaines additions minérales mobilisent peu de superplastifiant par rapport à d'autres. La figure 3.24 montre que le laitier granulé présente une demande en superplastifiant moins importante que celles de la poudre de marbre et de la poudre de verre. Certains auteurs [86,88] affirment que pour des valeurs importantes d'ajout (entre 30 et 60%), la poudre de verre consomme une quantité très importante de superplastifiant.

6.2.5. Influence du dosage en AV sur le temps d'écoulement au cône de Marsh

Parce que les résultats obtenus sur le groupe 6 sont ressemblants à ceux obtenus sur les groupes 4 et 5, sur les figures 25a, 25b sont représentés les résultats d'étalement en fonction de la variation de SP et de AV, le rapport C/PM est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport : $E/(C+PM) = 0,40$ pour la figure 25a, $E/(C+PM) = 0,45$ pour la 25b.

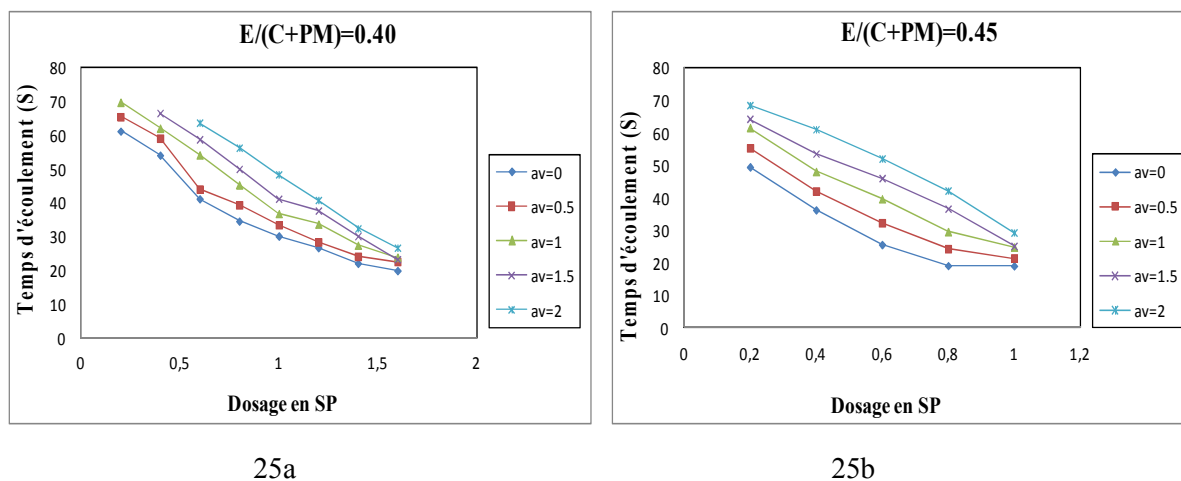


Figure 3.25 : Évolution du temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 4 et 5

Parce que les résultats obtenus sur le groupe 12 sont ressemblants à ceux obtenus sur les groupes 10 et 11, sur les figures 26a, 26b sont représentés les résultats d'étalement en fonction de la variation de SP et de AV, le rapport C/PV est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport : $E/(C+PV)=0,40$ pour la figure 26a, $E/(C+PV)=0,45$ pour la 26b.

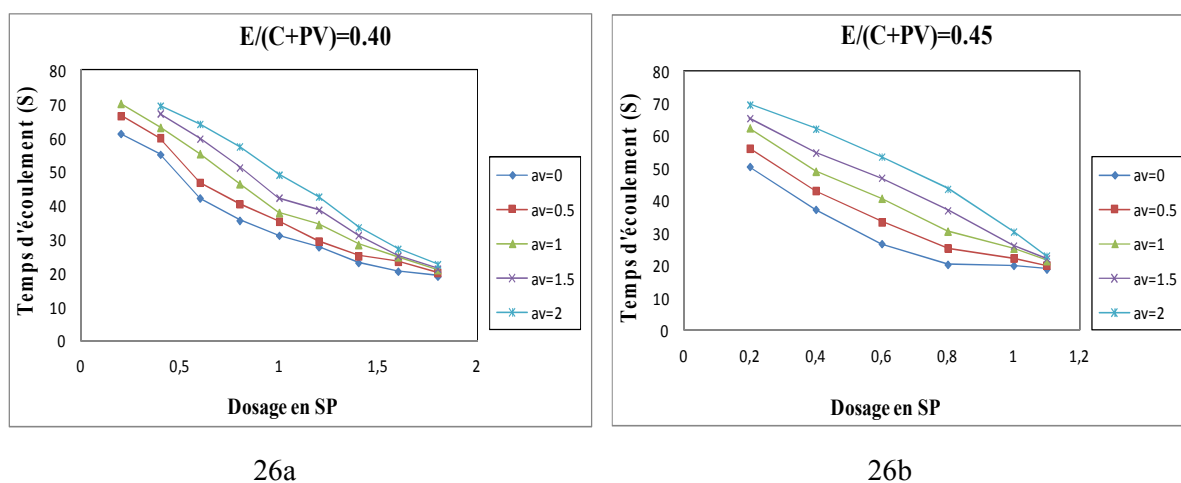


Figure 3.26 : Évolution du temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 10 et 11

Parce que les résultats obtenus sur le groupe 18 sont ressemblants à ceux obtenus sur les groupes 16 et 17, sur les figures 27a, 27b sont représentés les résultats d'étalement en fonction de la variation de SP et de AV, le rapport C/LG est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport : $E/(C+LG)=0,40$ pour la figure 27a, $E/(C+LG)=0,45$ pour la 27b.

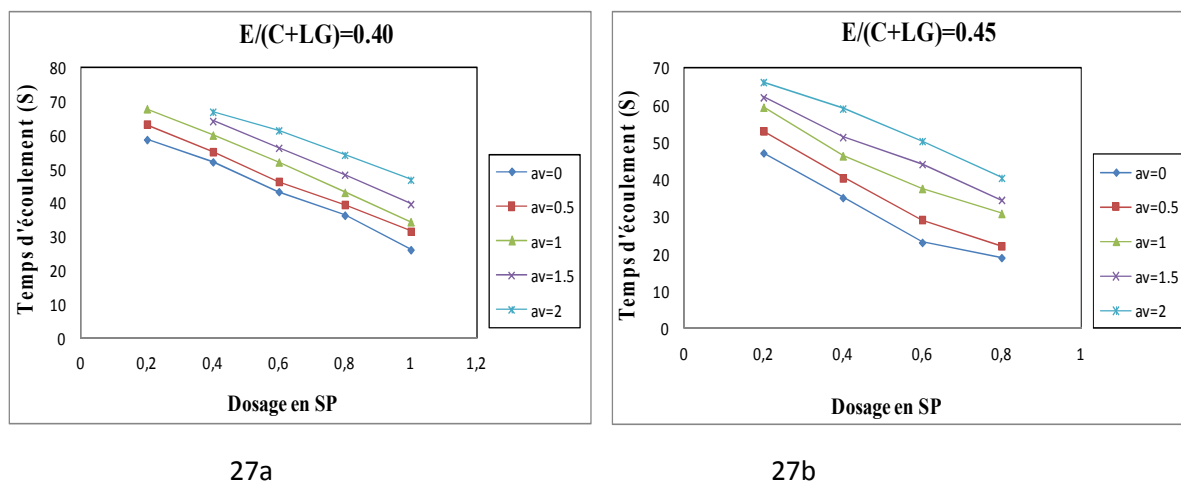


Figure 3.27 : Évolution du temps d'écoulement en fonction du dosage en SP pour les pâtes du groupe 16 et 17

L'influence de l'agent de viscosité sur le temps d'écoulement au cône de Marsh est présentée sur les figures 3.25 ; 26 et 27, En observant la variation du temps d'écoulement pour un même dosage de SP, nous remarquons que généralement le temps d'écoulement augmente avec le dosage de AV.

7. Synthèse

Nous avons effectué une étude rhéologique à l'aide des méthodes empiriques basées sur des essais d'ouvrabilité tels que le mini-cône et le cône de Marsh, dans le but de comprendre le rôle joué par différents paramètres (l'eau, dosages en addition, superplastifiant et agent de viscosité). L'étude préliminaire réalisée sur plusieurs pâtes a permis de tirer les renseignements suivants :

L'augmentation du dosage en superplastifiant fait augmenter l'étalement des pâtes et fait baisser le temps d'écoulement au cône de Marsh.

Pour les pâtes (sans AV et un SP fixé), une substitution de plus en plus grande de ciment par la poudre de marbre et la poudre de verre a diminué l'étalement au mini cône et a augmenté le temps d'écoulement au cône de Marsh.

Le laitier granulé améliore les propriétés rhéologiques, Jusqu'à un rapport $C/LG = 2$ (ciment sur laitier granulé égale à 2), se traduisant par une augmentation de l'étalement et diminution du temps d'écoulement au cône de Marsh.

Les essais réalisés montrent que les additions minérales consomment une part importante du superplastifiant, variable selon leurs natures. En effet, la nature de l'addition influencée sur la

demande en superplastifiant. Les résultats montrent que le laitier granulé présente la moindre demande en superplastifiant suivi de la poudre de marbre. La demande en superplastifiant du poudre de verre est la plus importante et devient très significative pour des forts dosages.

L'introduction de l'agent de viscosité dans les différentes compositions n'a pas une grande influence sur les mesures d'étalement et les mesures du temps d'écoulement au cône de Marsh.

Les tests empiriques, bien que très utiles parce que le matériel utilisé est simple, restent donc limités aux comparaisons des effets des produits sur l'écoulement des matériaux cimentaires et ne peuvent pas constituer des essais explicatifs.

1. Introduction

Le chapitre précédent a montré par les essais empiriques qui nous ont permis d'étudier pratiquement les principaux effets des additions et adjuvants sur l'écoulement des pâtes de béton, sans toutefois nous donner beaucoup d'indices sur les mécanismes d'action de ces produits ou sur les changements de lois rhéologiques qu'ils engendrent. En effet, ces essais donnent des résultats numériques, relevant d'échelles arbitraires, qui n'ont aucun rapport simple avec des propriétés physiques bien définies telles que le seuil de cisaillement et la viscosité. De plus, ils ne peuvent pas fournir de mesures sur toute la gamme des consistances possibles, contrairement à ceux réalisés avec des rhéomètres à fluides et suspensions.

2. Rhéomètre utilisé

L'étude des suspensions cimentaires est conduite dans un premier temps sur des essais d'ouvrabilité au moyen de l'étalement au mini-cône et l'écoulement au cône de Marsh. Dans un second temps, l'étude est menée sur une caractérisation de l'écoulement par des essais rhéologiques aboutissant à la mesure du seuil de cisaillement statique et à la viscosité apparente. Les essais de cette campagne expérimentale ont été réalisés à l'aide du rhéomètre HAAKE RHEOSTRESS 1.



Figure 4.1 : Rhéomètre HAAKE RHEOSTRESS 1

Le principe de l'essai consiste à cisailer un échantillon de pâte entre deux plateaux à surfaces horizontales, l'un au repos et l'autre mobile (rhéomètre à géométrie plan-plan). Ce rhéomètre est équipé d'une vanne Rotor à vitesse imposée. Après plusieurs ajustements, l'entrefer entre les deux

plateaux a été validé à 1,5 mm. Les essais sont réalisés à une température de 20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$). L'exploitation des courbes d'écoulement a été faite par le logiciel kaleida Graph (Version – 4.03).

Le protocole suivi pour nos essais est le suivant: un pré-cisaillement à 10 s^{-1} pendant 2 minutes précède chaque rampe de montée en vitesse. Cette étape permet de déstructurer le matériau et d'obtenir un état de référence identique à toutes les pâtes. Ensuite une rampe linéaire croissante de vitesse de 0 à 70 s^{-1} pendant 5 minutes est appliquée.

3. Méthodes de préparation des pâtes de ciment

La procédure de fabrication des pâtes, notamment l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur ainsi que la séquence de malaxage ont été les mêmes pour toutes les pâtes. Les séquences et la durée de malaxage qui ont servi à la confection des différentes pâtes d'études sont décrites dans le chapitre 3 (Cf. Chapitre 3, §3).

4. Formulations étudiées

Afin d'étudier l'influence de la nature et du dosage des additions minérales sur l'écoulement des pâtes, trois types d'additions de nature minéralogique différente ont été utilisées : la poudre de marbre, la poudre de verre et le laitier granulé. Les fines minérales ont été utilisées avec six dosages différents de C/A: 1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2 (C/A: rapport massique entre le ciment et l'addition). Les pâtes qui ont servi aux essais de ce programme expérimental, ont été gâchées avec trois rapports E/L de 0,40; 0,45; et 0,50 (E/L: rapport massique entre l'eau et liant (ciment + addition minérale)). Les pâtes qui ont servi à nos essais se composent de cinq constituants: le ciment, les additions, l'eau, le superplastifiant et l'agent de viscosité.

Tous les mélanges cimentaires du chapitre précédant (Cf. chapitre 3, §5) ont été étudiés à l'aide de rhéomètre HAAKE RHEOSTRESS 1.

5. Résultats et Discussions

Dans cette partie nous avons étudié le comportement au rhéomètre des différentes pâtes autoplacantes testées sans et avec l'agent de viscosité. Pour ces cas, nous avons étudié l'influence combinée de la teneur en addition et du dosage en SP sur le seuil de cisaillement et sur la viscosité plastique.

Les rhéogrammes enregistrés par nos essais au rhéomètre HAAKE RHEOSTRESS 1 sur les différentes pâtes suivent une loi du type Herschel-Bulkley qui s'exprime par la relation (1) suivante. Ce résultat est conforme à ce que l'on trouve dans la littérature [94, 95, 96, 97 et 98].

$$\tau = \tau_o + b(\dot{\gamma})^c \quad (1)$$

Où: τ est la contrainte de cisaillement, τ_o est le seuil de cisaillement qui correspond à l'ordonnée à l'origine du rhéogramme, $\dot{\gamma}$ représente la vitesse de cisaillement, c représente l'indice de fluidité.

Pour chaque formulation, les paramètres rhéologiques rapportés ici correspondent à des valeurs moyennes sur une période d'au moins 3 essais réalisés sur une pâte fraîchement préparée.

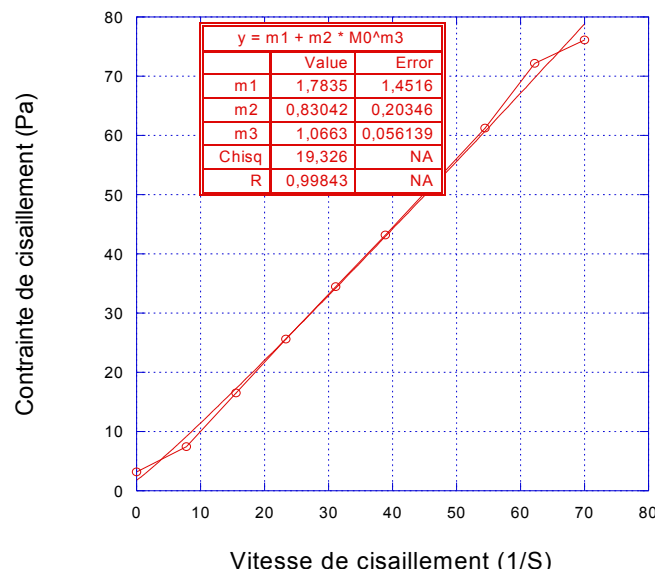


Figure 4.2 : Exemple de rhéogramme obtenu avec le rhéomètre HAAKE RHEOSTRESS 1

Les courbes obtenues changent de paramètres en fonction de la quantité et la nature d'addition ajoutée et de la présence ou pas du superplastifiant ou de l'agent de viscosité.

5.1. Influence du dosage en SP sur le seuil de cisaillement

Sur la figure 4.3 suivante sont représentées les courbes d'évolution du seuil de cisaillement en fonction du SP pour le cas de pâtes des groupes 1 et 2 et 3.

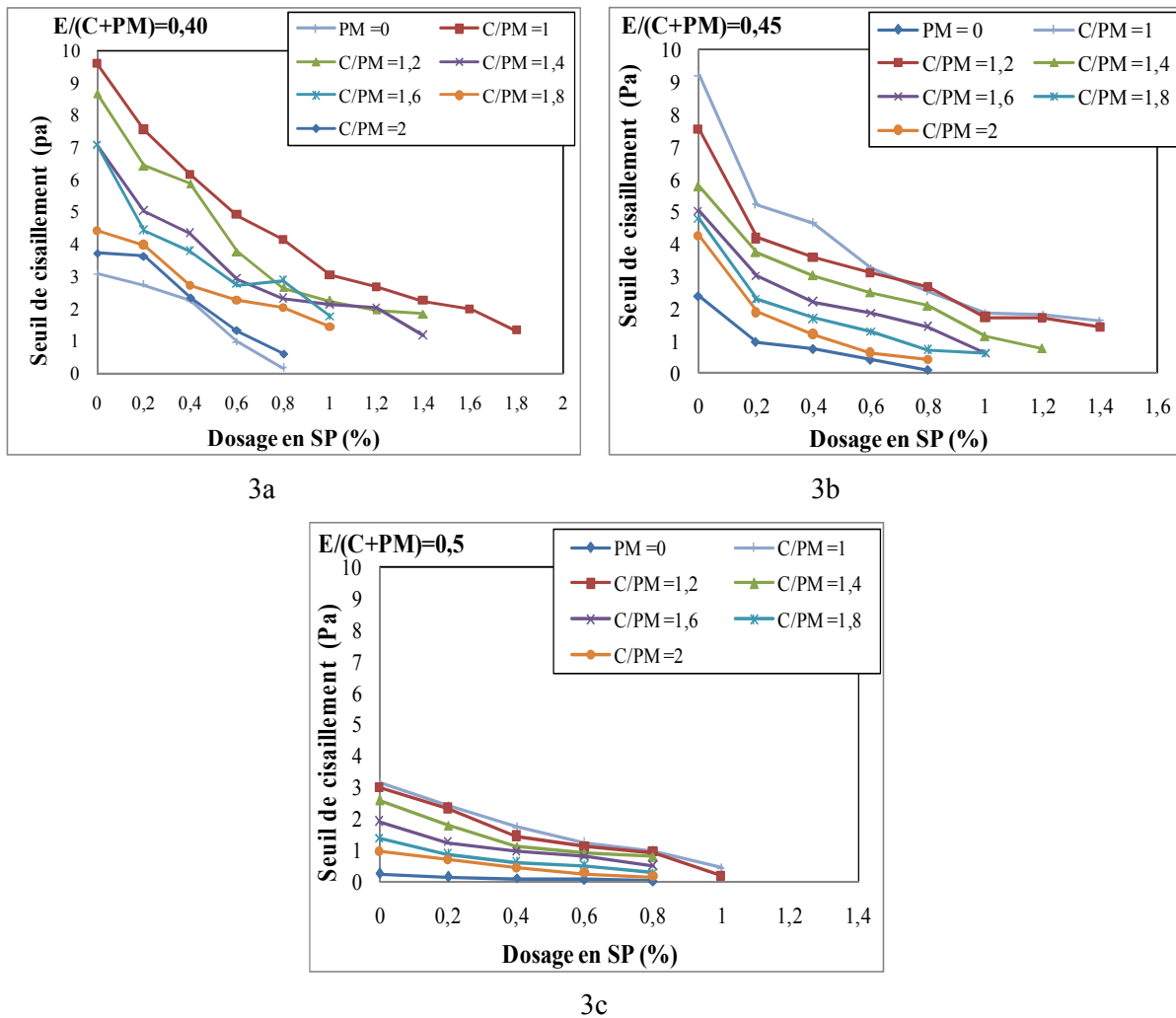
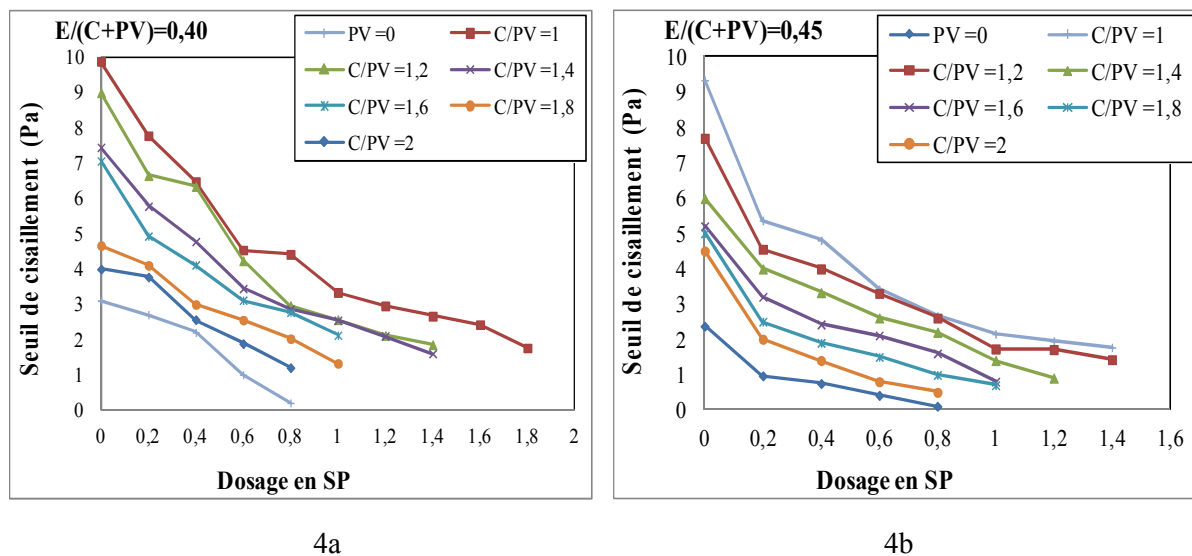
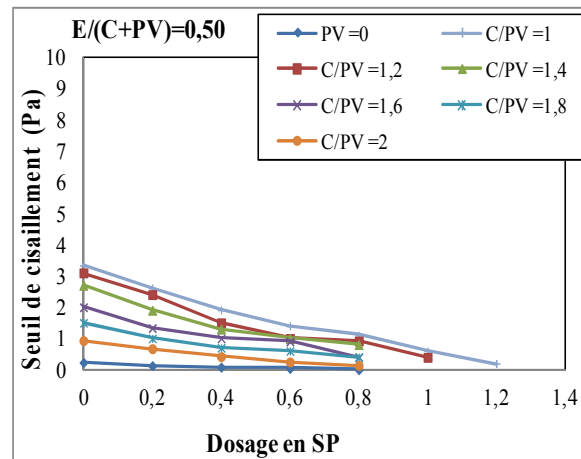


Figure 4.3 : Évolution du seuil de cisaillement en fonction du SP des pâtes des groupes 1, 2 et 3

Sur la figure 4.4 suivante sont représentées les courbes d'évolution du seuil de cisaillement en fonction du SP pour le cas de pâtes des groupes 7 et 8 et 9.

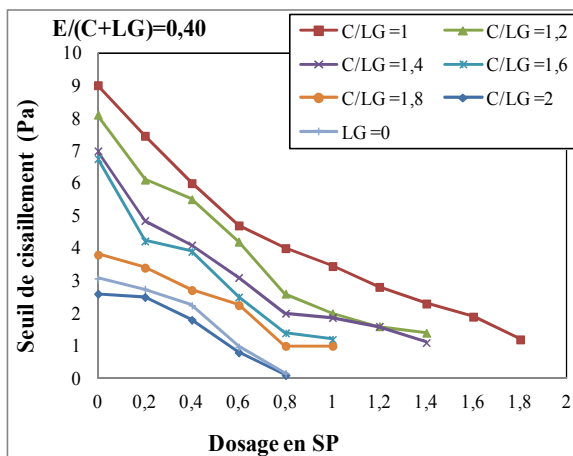




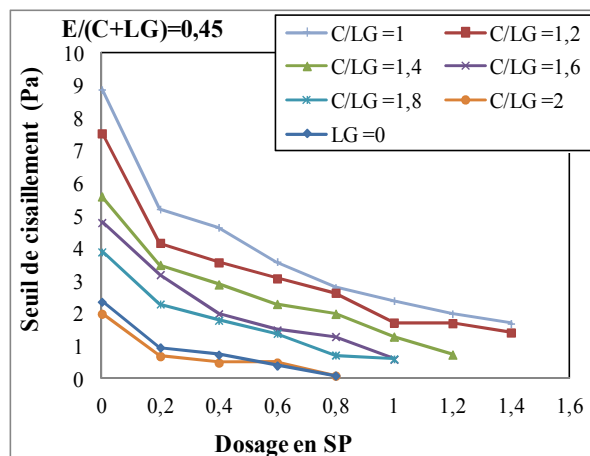
4c

Figure 4.4 : Évolution du seuil de cisaillement en fonction du SP des pâtes des groupes 7, 8 et 9

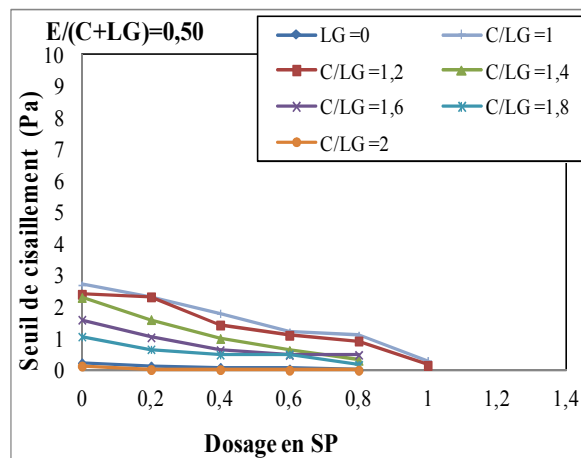
Sur la figure 4.5 suivante sont représentées les courbes d'évolution du seuil de cisaillement en fonction du SP pour le cas de pâtes des groupes 13 et 14 et 15.



5a



5b



5b

Figure 4.5 : Évolution du seuil de cisaillement en fonction du SP des pâtes des groupes 13, 14 et 15

Sur ces figures on constate que pour ces pâtes autoplaçantes les valeurs de seuil de cisaillement mesurées évoluent en baisse avec l'augmentation du SP, cela en maintenant tous les autres paramètres constants (rapports E/L et C/A).

Suivant le mode d'action du SP et l'interaction adjuvant- particule , à savoir, la compatibilité et l'affinité entre le ciment et le SP, ce dernier enrobe les grains, surtout les particules fines, (ciment et fine d'ajout) en s'adsorbant à leur surface et faire en sorte de les défloculer [99, 100].

Quand à la substitution du ciment par de l'addition, plus on met d'addition (C/A diminue) plus le seuil de cisaillement est plus grand, et donc il faut plus de superplastifiant pour fluidifier les pâtes formulées avec le même rapport E/L. Donc le seuil de cisaillement augmente avec la substitution du Ciment par d'addition en maintenant le SP constant.

Il est intéressant de noter que les valeurs de seuil de cisaillement dans le cas du laitier granulé, avec un rapport (C/LG = 2) Sont inférieurs à celles de pâtes de références (LG = 0), quel que soit le rapport E/(C+LG).

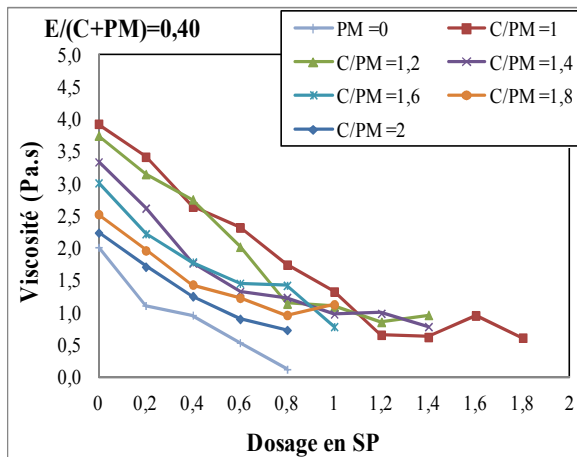
Par ailleurs, on constate également que les valeurs de seuil de cisaillement baissent avec l'augmentation du rapport E/L cela en comparant les neuf groupes de graphes des figures 4.3; 4 et 5.

La baisse constatée est légère entre les mêmes pâtes à rapports (E/L = 0,40 et 0,45). Par contre cette baisse est importante entre les pâtes à rapports (E/L = 0,45 et 0,50).

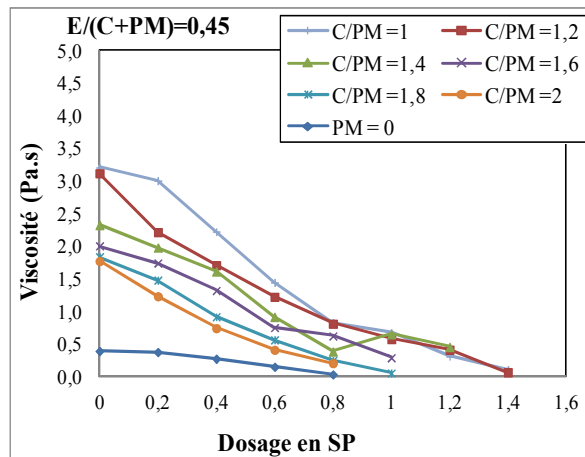
Cela veut donc dire qu'il est possible d'obtenir des mélanges à faible seuil compatibles avec le comportement autoplaçant quel que soit le dosage en addition, à condition que le dosage en superplastifiant soit proche de la saturation et que le rapport E/L ne soit pas trop faible.

5.2. Influence du dosage en SP sur la viscosité plastique

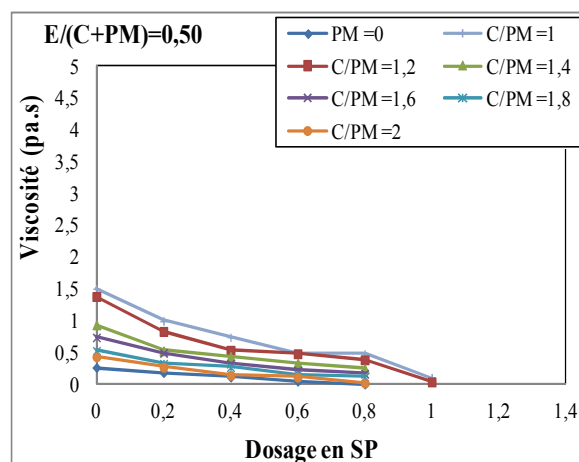
Dans le cas des groupes 1, 2 et 3 nous avons étudié l'influence combinée de la teneur en PM et du SP sur la viscosité des différentes pâtes autoplaçantes.



6a



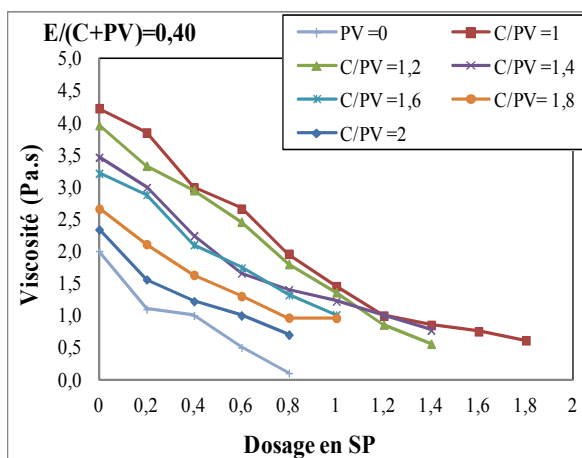
6b



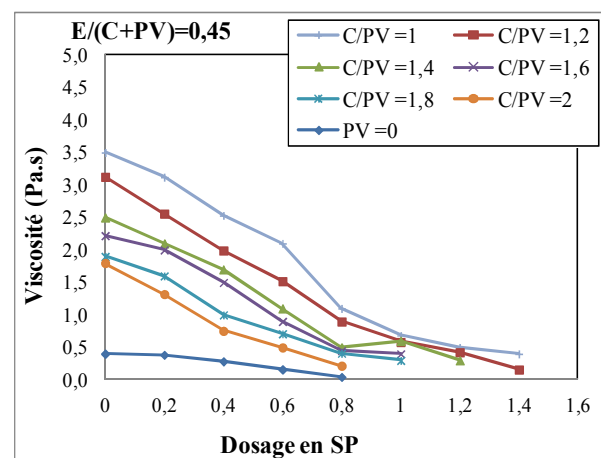
6c

Figure 4.6 : Evolution de la viscosité plastique en fonction de SP pour les pâtes des groupes 1, 2 et 3

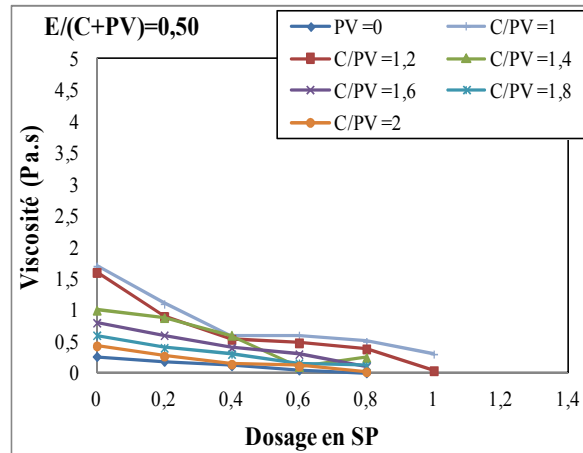
Dans le cas des groupes 7, 8 et 9 nous avons étudié l'influence combinée de la teneur en PV et du SP sur la viscosité des différentes pâtes autoplacantes.



7a



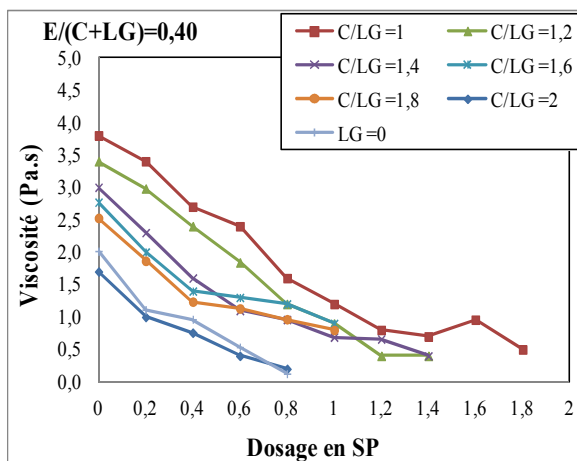
7b



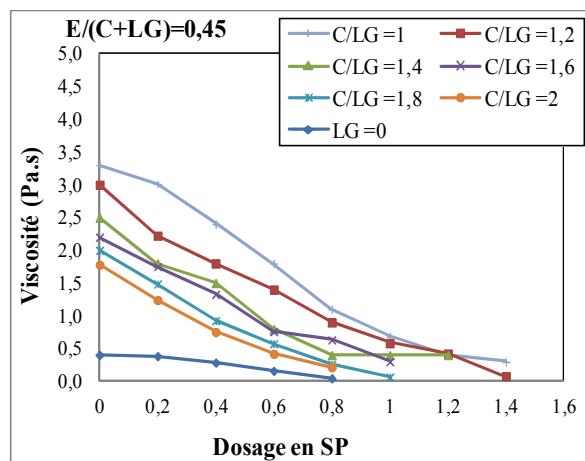
7c

Figure 4.7 : Evolution de la viscosité plastique en fonction de SP pour les pâtes des groupes 7, 8 et 9

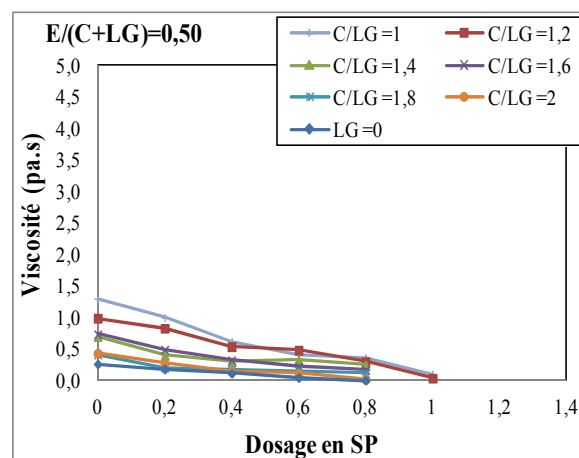
Dans le cas des groupes 13, 14 et 15 nous avons étudié l'influence combinée de la teneur en LG et du SP sur la viscosité des différentes pâtes autoplaçantes.



8a



8b



8c

Figure 4.8 : Evolution de la viscosité plastique en fonction de SP pour les pâtes des groupes 13, 14 et 15

À partir de ces figures on constate que les valeurs de la viscosité plastique mesurées pour ces pâtes évoluent en baisse avec l'augmentation du SP cela en maintenant les rapports (E/L et C/A) constants.

Quand à la substitution du ciment par de l'addition, plus on met de l'addition (C/A diminue) plus la viscosité plastique est grande ; donc la viscosité augmente avec la substitution du ciment par de l'addition en maintenant le SP constant.

L'accroissement du dosage en additions conduit à l'augmentation de la concentration volumique et par conséquent favorise généralement l'accroissement de la viscosité du mélange indépendamment de la nature de l'addition. En effet, il semble que l'encombrement de particules dans la suspension, agit en augmentant la viscosité apparente, du fait de l'augmentation des contraintes de frottement [89].

Par ailleurs, on constate également que les valeurs de la viscosité plastique baissent avec l'augmentation du rapport E/L cela en comparant les neuf images des figures 4.6; 7 et 8.

De tous les résultats obtenus, nous pouvons dire que plus le SP augmente plus l'écoulement du matériau se rapproche de l'écoulement newtonien et ce grâce à l'effet dispersant de SP, résultats aussi confirmés dans la littérature [101, 102].

5.3. Influence du dosage en AV sur le seuil de cisaillement

Sur la figure 4.9 sont représentés les résultats du seuil de cisaillement en fonction de la variation du AV et du SP, le rapport C/PM est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport E/(C+PM) égale à (0,40 pour le groupe 4 ; 0,45 pour le groupe 5 et 0,50 pour le groupe 6).

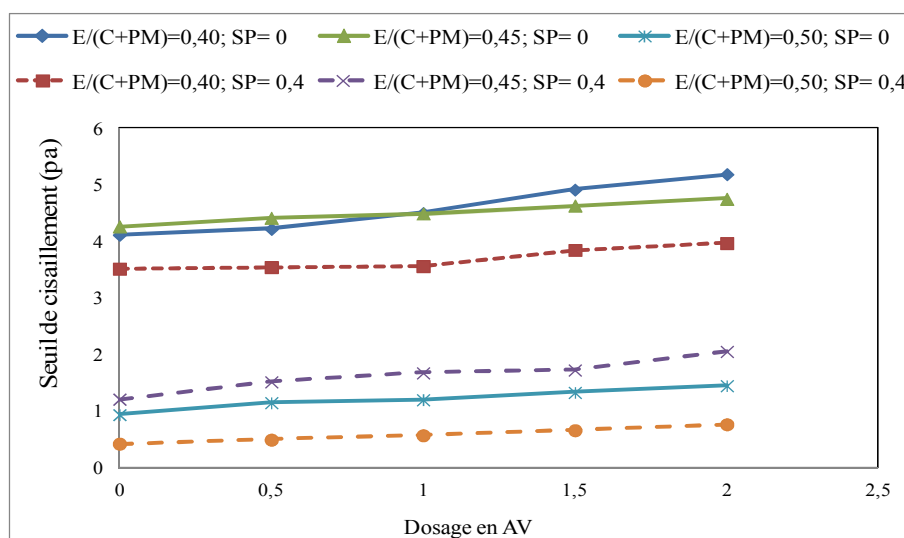


Figure 4.9 : Evolution de la viscosité plastique en fonction de SP pour les pâtes des groupes 13, 14 et 15

Sur la figure 4.10 sont représentés les résultats du seuil de cisaillement en fonction de la variation du AV et du SP, le rapport C/PV est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport $E/(C+PV)$ égale à (0,40 pour le groupe 10 ; 0,45 pour le groupe 11 et 0,50 pour le groupe 12).

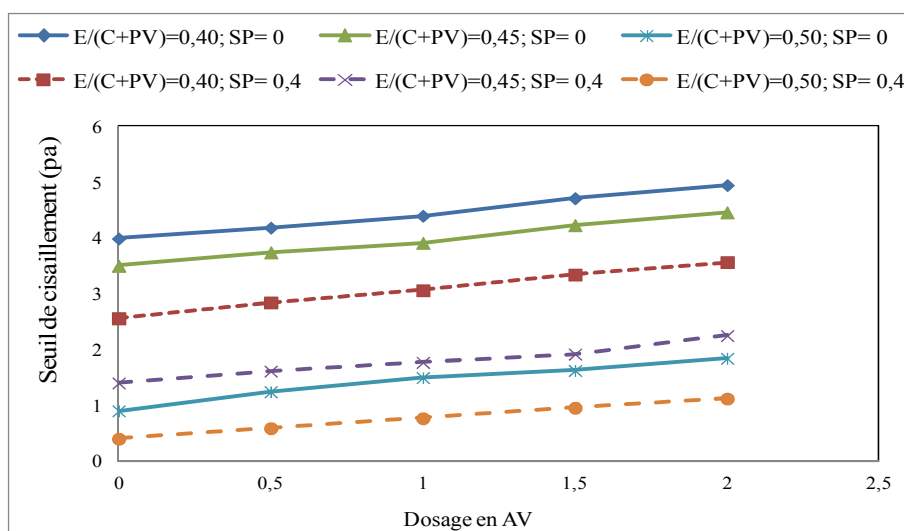


Figure 4.10 : Évolution du seuil de cisaillement en fonction du AV et du SP des pâtes des groupes 10, 11 et 12

Sur la figure 4.11 sont représentés les résultats du seuil de cisaillement en fonction de la variation du AV et du SP, le rapport C/LG est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport $E/(C+LG)$ égale à (0,40 pour le groupe 16 ; 0,45 pour le groupe 17 et 0,50 pour le groupe 18).

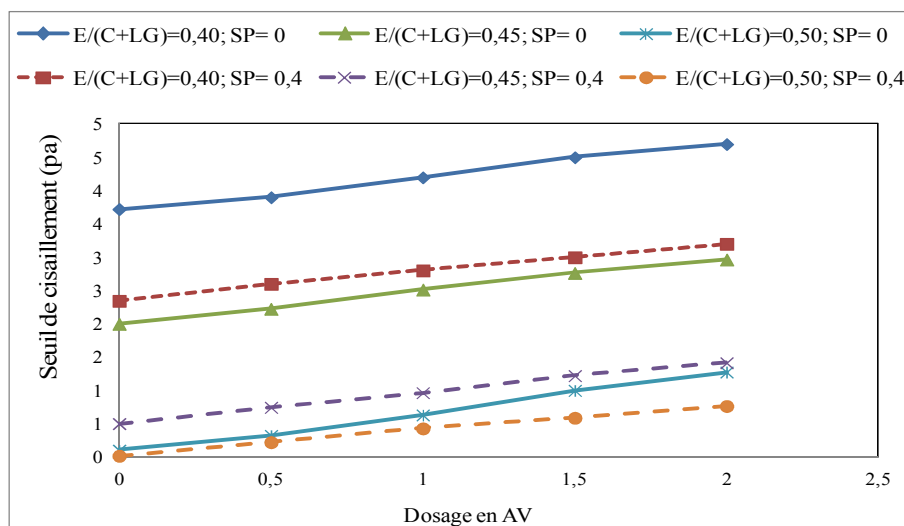


Figure 4.11 : Évolution du seuil de cisaillement en fonction du AV et du SP des pâtes des groupes 16, 17 et 18

Pour la figure 4.9; 10 et 11 on constate que pour ces pâtes autoplaçantes les valeurs de seuil de cisaillement mesurées évoluent avec une légère hausse avec l'augmentation du AV, cela en maintenant tous les autres paramètres constants (E/L , C/A et SP). Ce résultat est conforme à

l'usage de l'agent de viscosité qui est souvent utilisé pour rendre les matériaux visqueux sans affecter leur seuil de cisaillement.

L'introduction du SP à un dosage de 0,4 % a fait baisser le seuil de cisaillement. La baisse produite entre les formules sans SP et celles à 0,4 % SP est uniforme car les courbes évoluent parallèlement.

Par ailleurs, on constate également que les valeurs du seuil baissent avec l'augmentation du rapport E/L.

5.4. Influence du dosage en AV sur la viscosité plastique

Sur la figure 4.12 sont représentés les résultats de la viscosité en fonction de la variation du AV et du SP, le rapport C/PM est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport E/(C+PM) égale à (0,40 pour le groupe 4 ; 0,45 pour le groupe 5 et 0,50 pour le groupe 6).

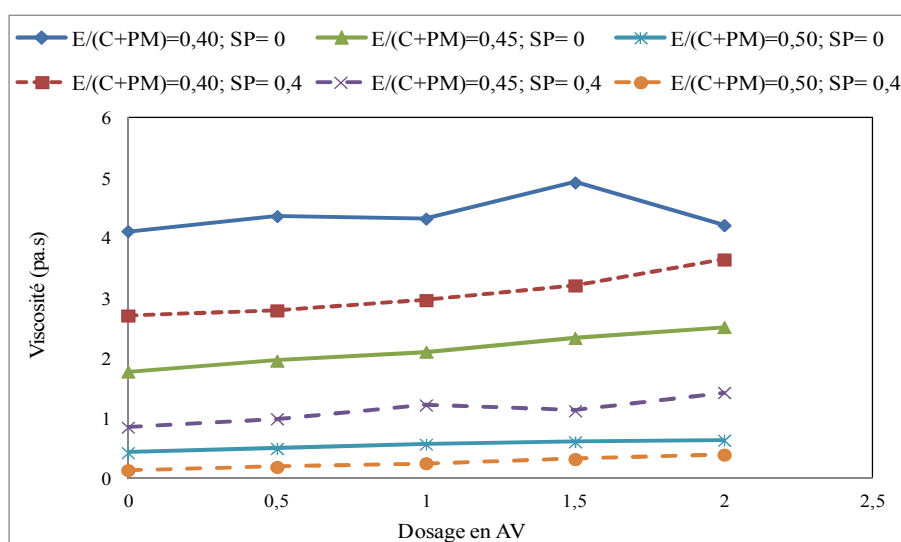


Figure 4.12 : Évolution de la viscosité en fonction du AV et du SP des pâtes des groupes 4, 5 et 6

Sur la figure 4.13 sont représentés les résultats de la viscosité en fonction de la variation du AV et du SP, le rapport C/PV est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport E/(C+PV) égale à (0,40 pour le groupe 10 ; 0,45 pour le groupe 11 et 0,50 pour le groupe 12).

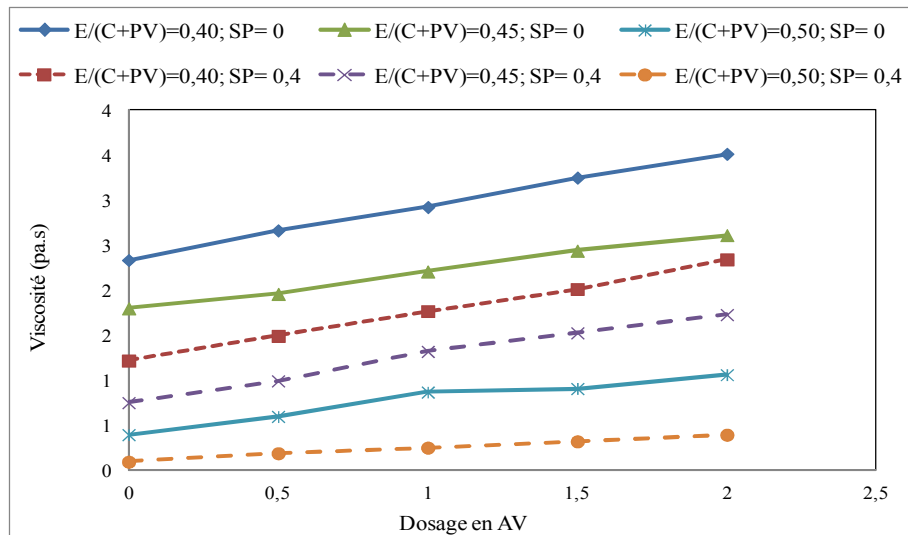


Figure 4.13 : Évolution de la viscosité en fonction du AV et du SP des pâtes des groupes 10, 11 et 12
 Sur la figure 4.14 sont représentés les résultats de la viscosité en fonction de la variation du AV et du SP, le rapport C/LG est fixé à 2, les pâtes sont formulées à un rapport E/(C+LG) égale à (0,40 pour le groupe 16 ; 0,45 pour le groupe 17 et 0,50 pour le groupe 18).

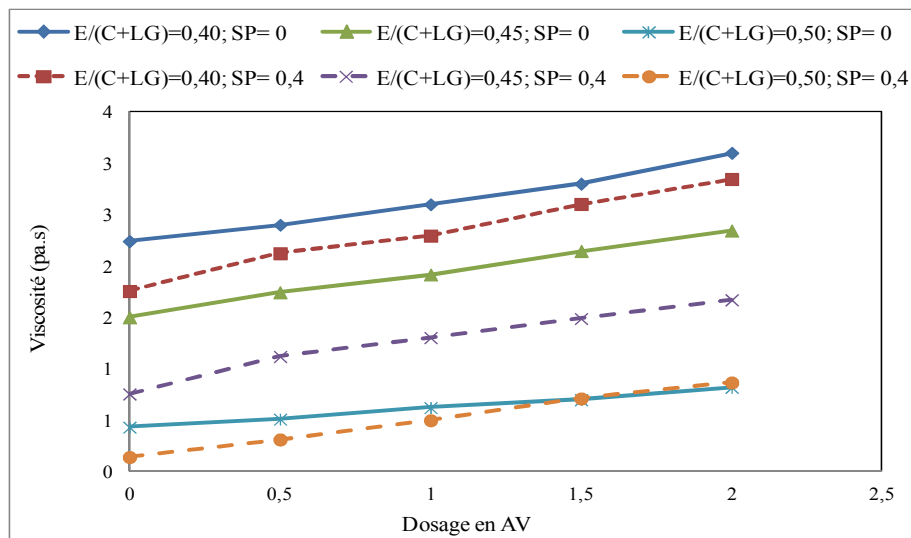


Figure 4.14 : Évolution de la viscosité en fonction du AV et du SP des pâtes des groupes 16, 17 et 18
 Pour ces figures on constate que pour ces pâtes autoplaçantes les valeurs de la viscosité plastique mesurées évoluent en légère hausse avec l'augmentation du AV, cela en maintenant tous les autres paramètres constants (E/L, C/A et SP).

De même que pour le seuil de cisaillement, les valeurs de la viscosité plastique diminuent avec l'augmentation du rapport E/L soit avec l'augmentation de la quantité d'eau dans la pâte. Et pour le cas où $E/L = 0,5$ les valeurs de la viscosité plastique sont très faibles.

Pour l'effet de l'agent de viscosité sur la viscosité plastique, pour ce cas de pâtes autoplaçantes, il est légèrement faible par rapport à ce que l'on y présupposait, car le rôle principal des agents de viscosité est d'apporter de la robustesse aux pâtes.

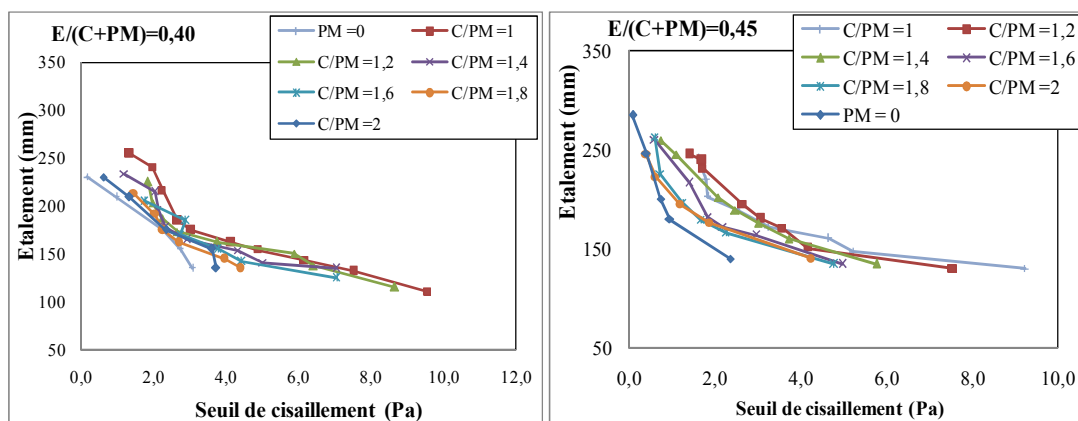
6. Relation entre les essais empiriques et mesures rhéologiques

Un rhéomètre adapté aux pâtes de ciment n'est pas largement disponible dans l'industrie de la construction en raison de son coût relativement important et au manque de mode opératoire adéquat. Les résultats de mesure obtenus par le rhéomètre HAAKE RHEOSTRESS 1 ont été utilisés pour établir une corrélation avec les mesures rhéologiques des essais empiriques (essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement au cône de Marsh). Une comparaison entre les mesures rhéologiques et les résultats des essais empiriques sont présentés dans la suite de cette partie.

6.1. Relation entre étalement au mini-cône et seuil de cisaillement

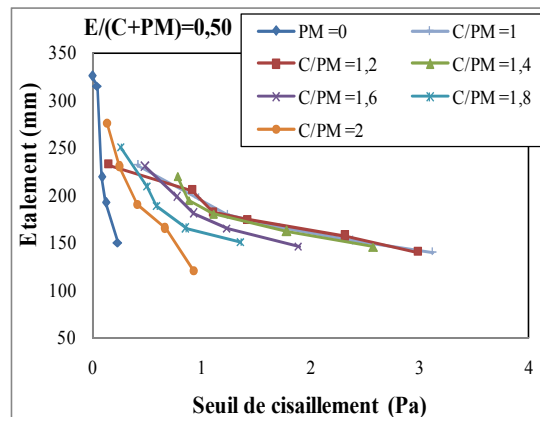
6.1.1. Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement des résultats des groupes (sans AV)

Les figures 4.15; 16 et 17 montrent une diminution de l'étalement pour des différentes pâtes avec l'augmentation du seuil de cisaillement. Ces résultats confirment ceux de plusieurs auteurs [103, 104, 105].



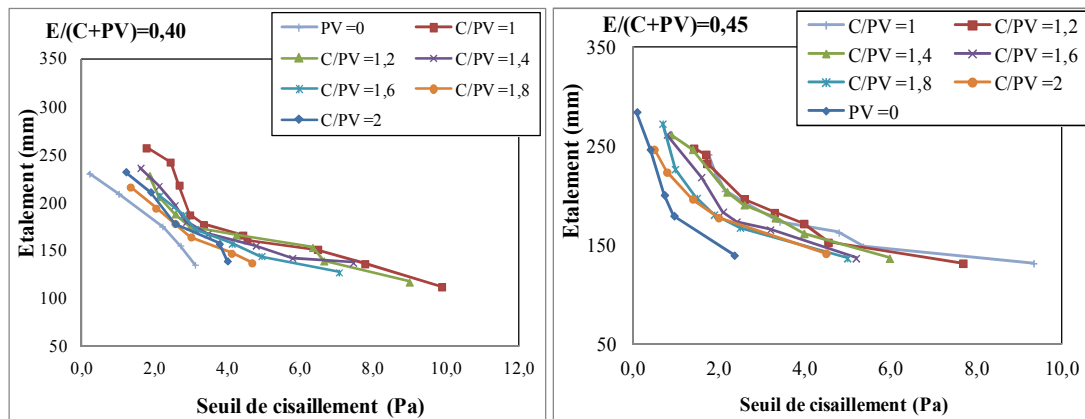
15a

15b



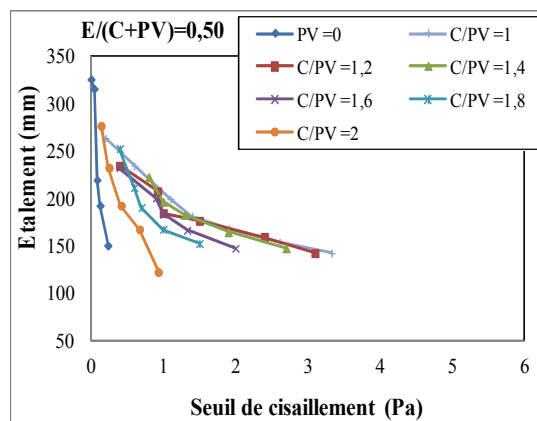
15c

Figure 4.15 : Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 1, 2 et 3



16a

16b



16c

Figure 4.16 : Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 7, 8 et 9

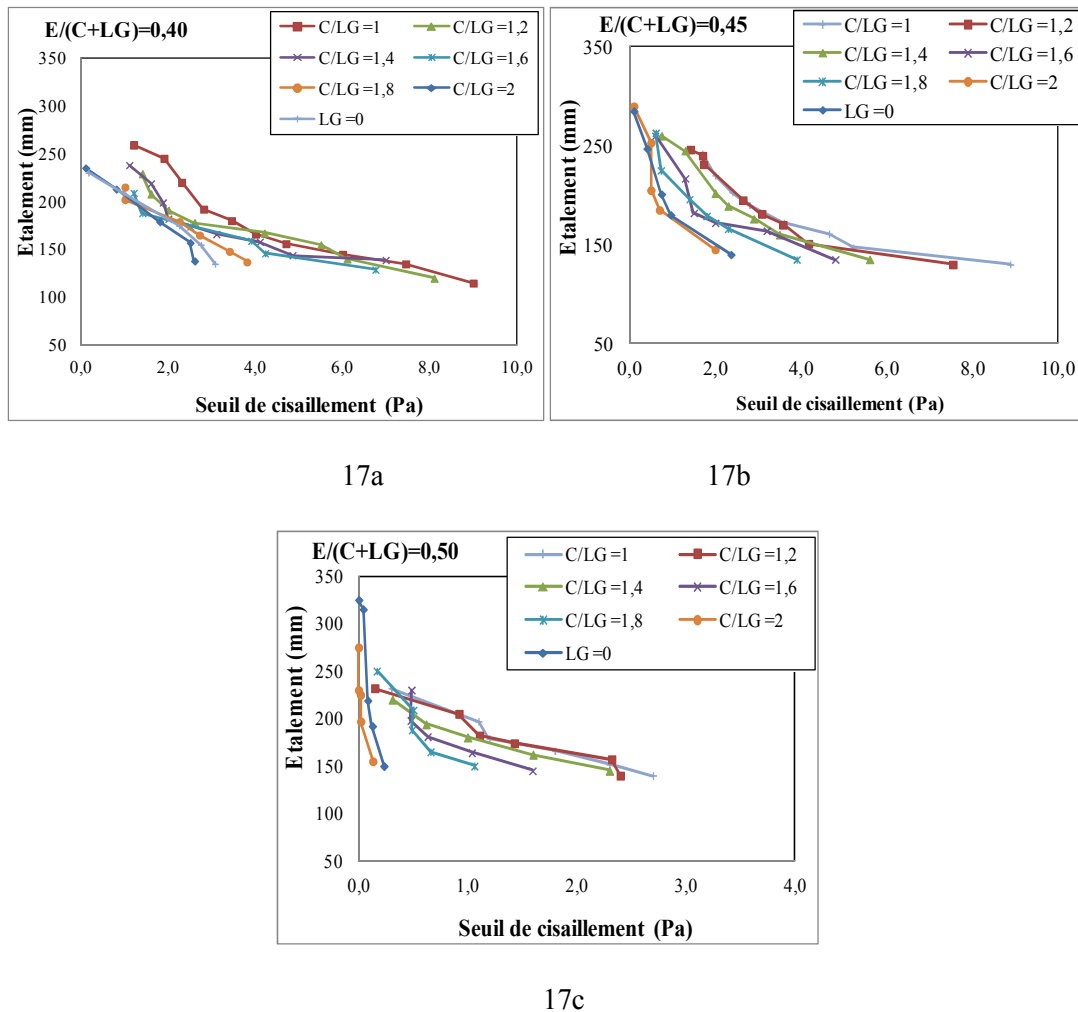


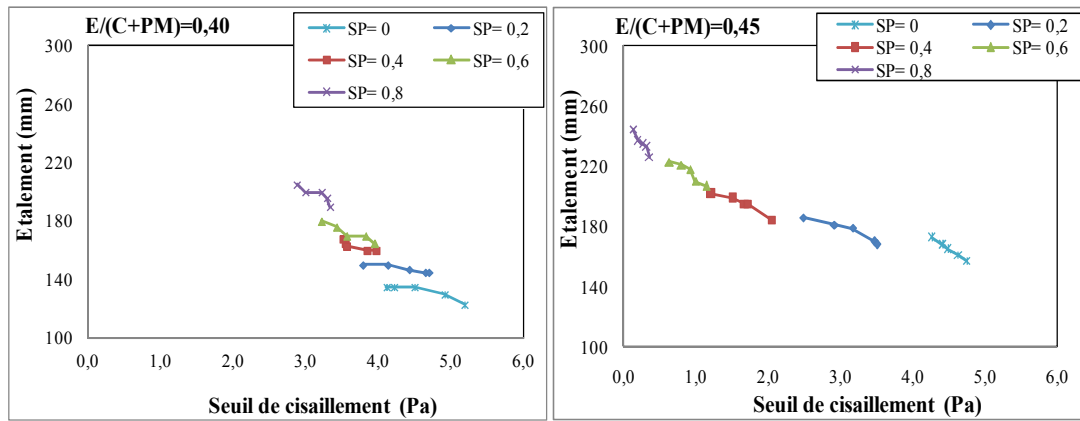
Figure 4.17 : Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 13, 14 et 15

Cette représentation, pour des pâtes formulées avec le même rapport E/L soit donc avec la même quantité d'eau, sans l'agent de viscosité, nous permet de conclure que :

- l'étalement baisse avec l'augmentation du seuil de cisaillement et donc la réduction du dosage en superplastifiant.
- l'étalement baisse avec l'augmentation du seuil de cisaillement et donc la baisse du rapport C/A soit avec l'augmentation de la quantité d'addition.

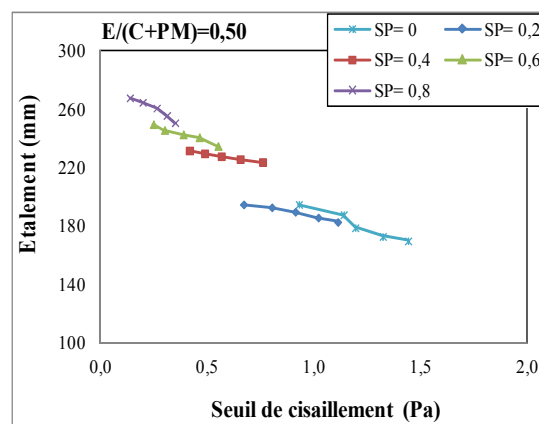
6.1.2. Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement des résultats des groupes (avec AV)

Les résultats représentés sur les figures 4.18; 19 et 20 correspondent à ceux des corrélations entre les résultats d'étalement et du rhéomètre ; résultats des pâtes formulées avec le même rapport E/L soit donc avec la même quantité d'eau et un rapport C/A = 2 en présence de l'agent de viscosité.



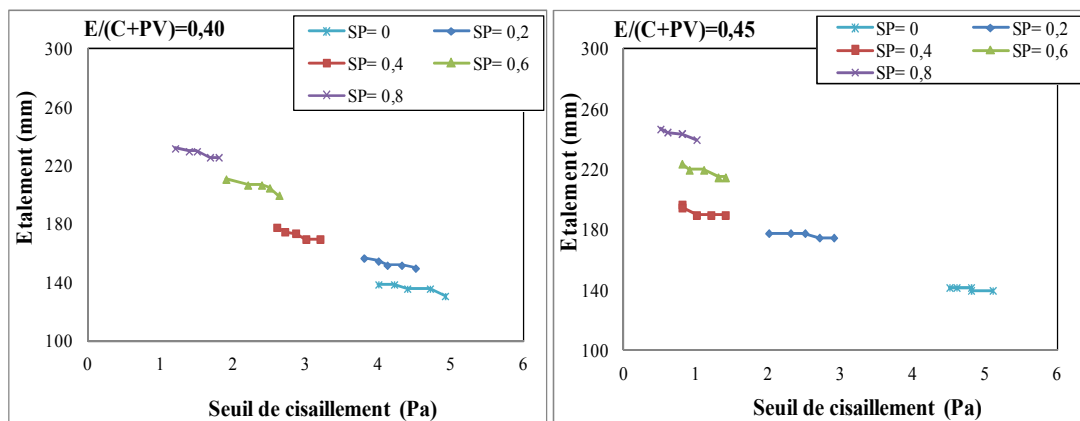
18a

18b



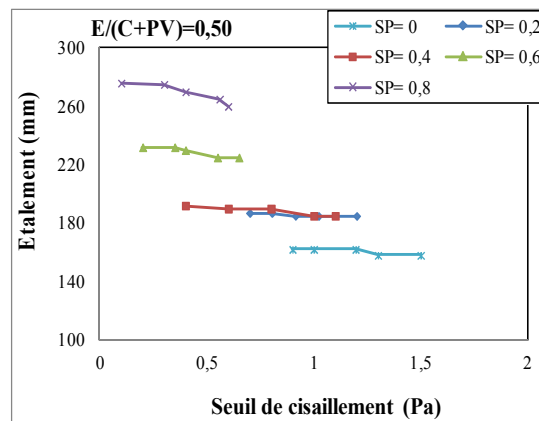
18c

Figure 4.18 : Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 4, 5 et 6



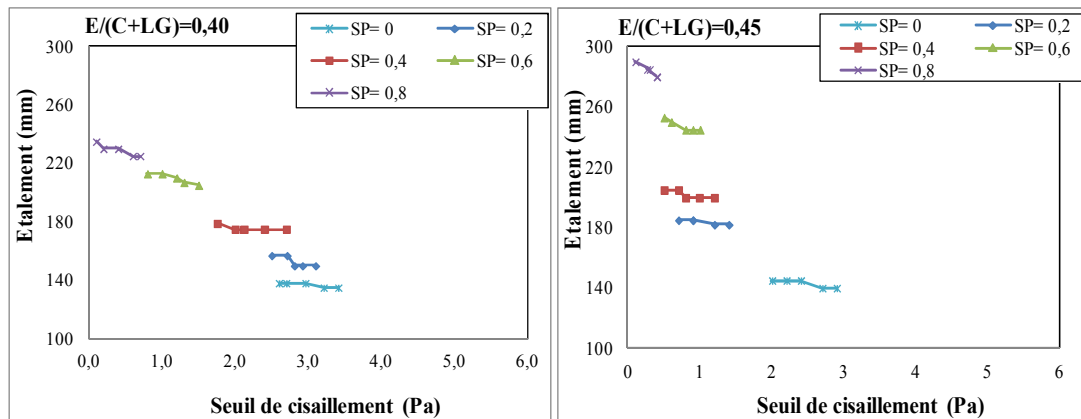
19a

19b



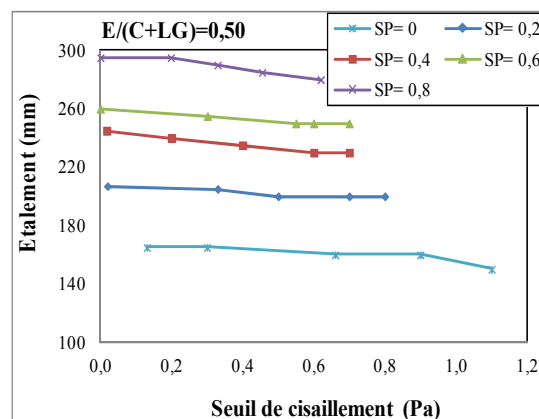
19c

Figure 4.19 : Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 10, 11 et 12



20a

20b



20c

Figure 4.20 : Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement pour les pâtes du groupe 16, 17 et 18

Les résultats des figures 4.18; 19 et 20 nous permet de constater que :

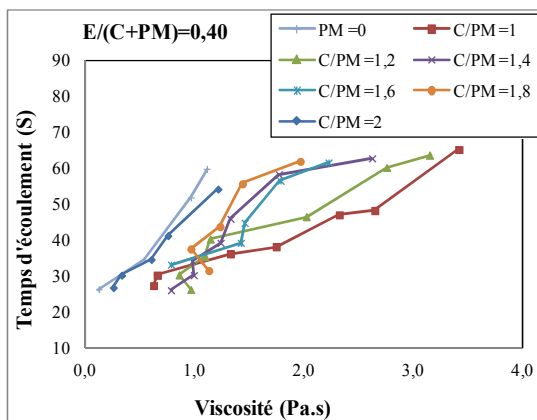
- l'étalement baisse avec l'augmentation du seuil de cisaillement et donc l'augmentation du dosage en agent de viscosité.

- de même que sur les figures 4.15; 16 et 17, l'étalement baisse avec l'augmentation du seuil de cisaillement et donc la réduction du dosage en superplastifiant.

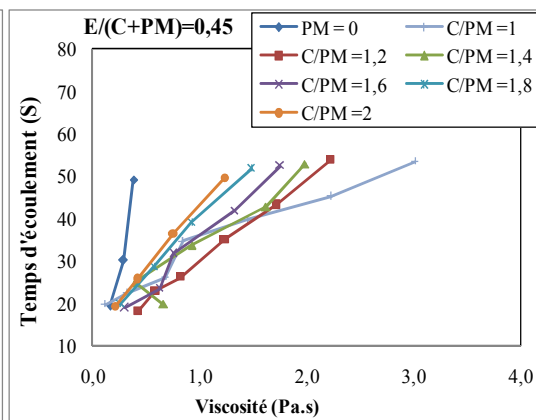
6.2. Relation entre le temps d'écoulement au cône de Marsh et viscosité

6.2.1. Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité des résultats des groupes (sans AV)

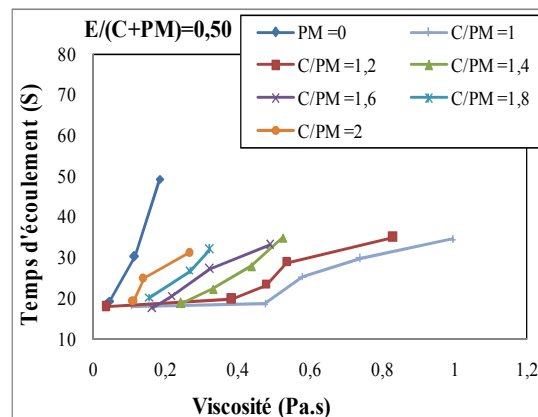
Les figures 4.21; 22 et 23 montrent une augmentation du temps d'écoulement pour des différentes pâtes avec l'augmentation de la viscosité plastique. Ces résultats confirment ceux de plusieurs auteurs [82, 106].



21a

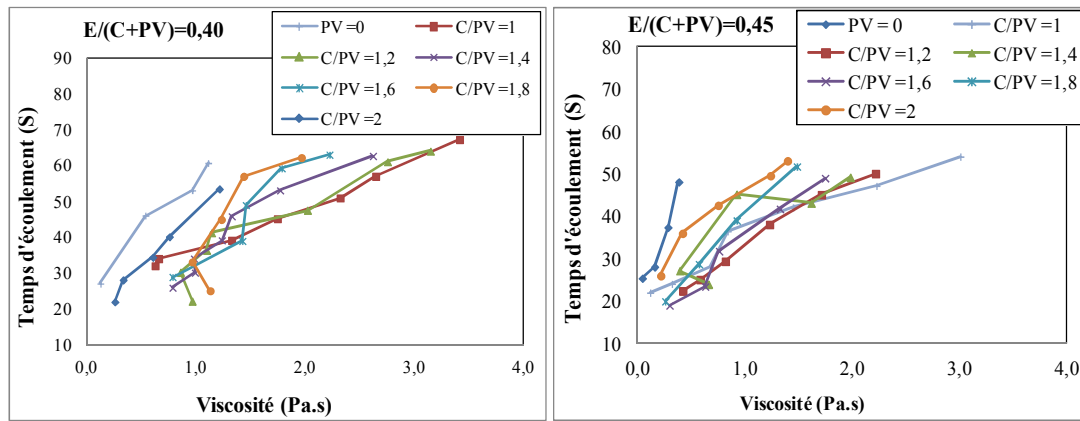


21b



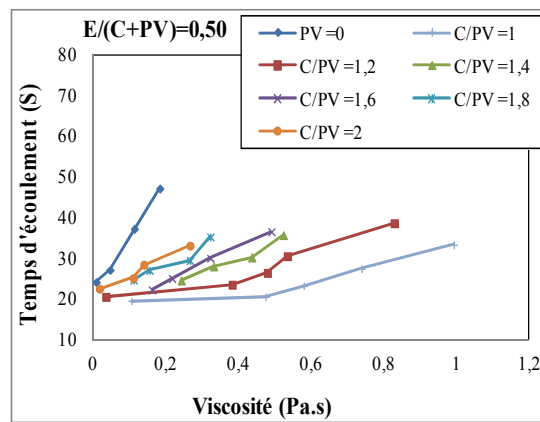
21c

Figure 4.21 : Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 1, 2 et 3



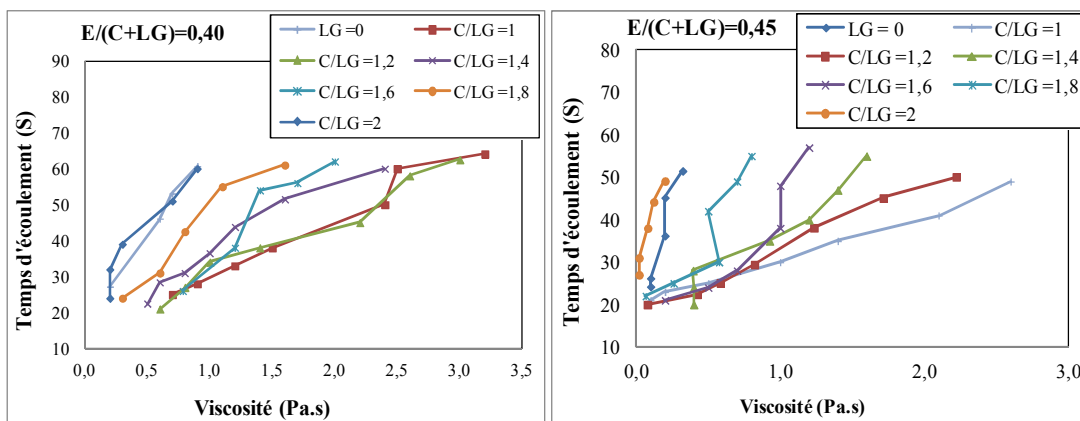
22a

22b



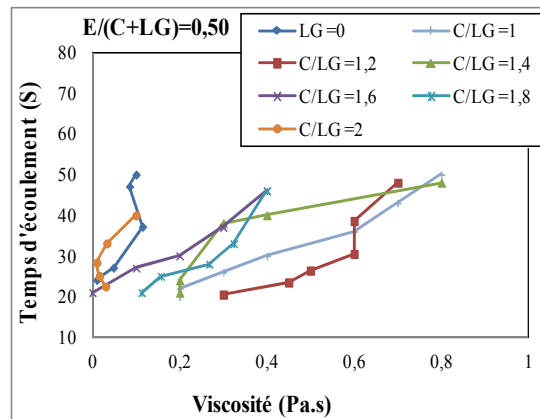
22c

Figure 4.22 : Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 7, 8 et 9



23a

23b



23c

Figure 4.23 : Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 13, 14 et 15

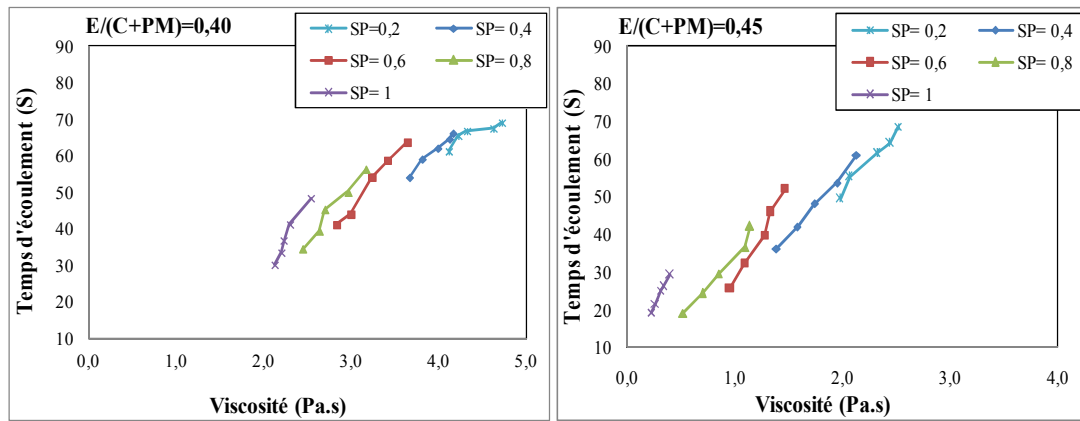
Les résultats obtenus sur les figures 4.21; 22 et 23 présentent une bonne corrélation entre la viscosité et le temps d'écoulement au cône de Marsh pour un volume représentatif de 1000ml.

Cette représentation, pour des pâtes formulées avec le même rapport ($E/(C+\text{addition})$) soit donc avec la même quantité d'eau, sans l'agent de viscosité, nous permet de conclure que :

- le temps d'écoulement augment avec l'augmentation de la viscosité plastique et donc la réduction du dosage en superplastifiant.
- le temps d'écoulement augment avec l'augmentation de la viscosité plastique et donc la baisse du rapport C/A soit avec l'augmentation de la quantité d'addition.

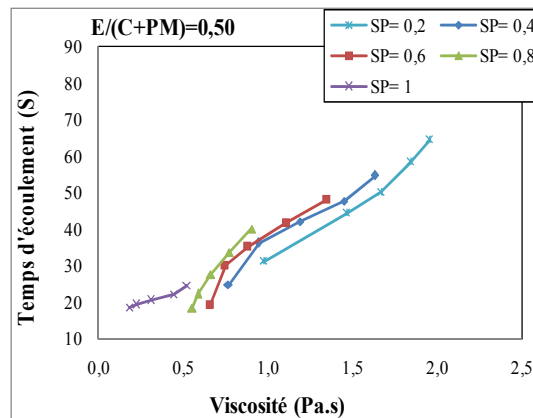
6.2.2. Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité des résultats des groupes (avec AV)

Les résultats représentés sur les figures 4.24; 25 et 26 correspondent à ceux des corrélations entre les résultats d'écoulement au cône de Marsh et du rhéomètre ; résultats des pâtes formulées avec le même rapport E/L soit donc avec la même quantité d'eau et un rapport C/A = 2 en présence de l'agent de viscosité.



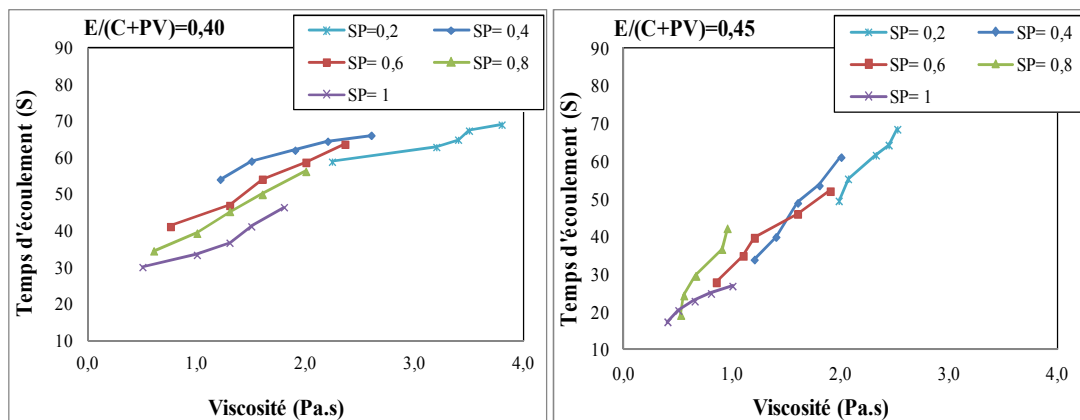
24a

24b



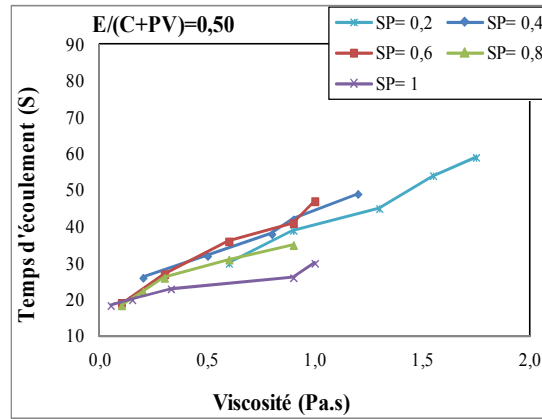
24c

Figure 4.24 : Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 4, 5 et 6



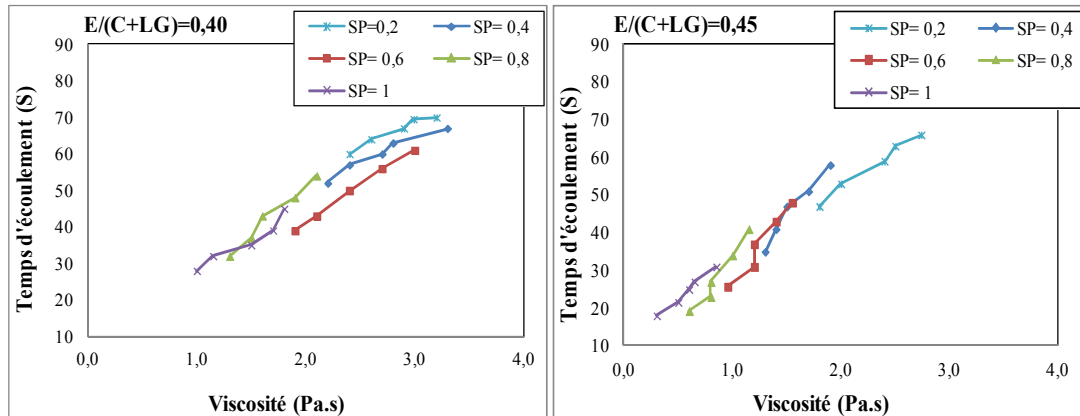
25a

25b



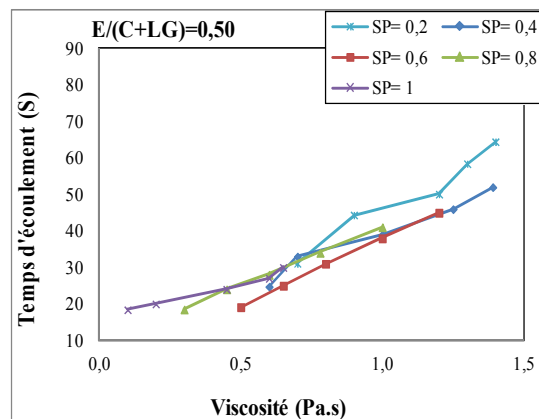
25c

Figure 4.25 : Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 10, 11 et 12



26a

26b



26c

Figure 4.26 : Corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité pour les pâtes du groupe 16, 17 et 18

Les résultats des figures 4.24; 25 et 26 nous permet de constater que :

- le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation de la viscosité plastique et donc l'augmentation du dosage en agent de viscosité.

- de même que sur les figures 4.21; 22 et 23, le temps d'écoulement augment avec l'augmentation de la viscosité plastique et donc la réduction du dosage en superplastifiant.

7. Synthèse

La première partie de cette étude a été réalisée à l'aide des méthodes empiriques basées sur des essais d'ouvrabilité tels que le mini-cône et le cône de Marsh, reliant les propriétés de consistance à des paramètres rhéologiques tels que le seuil de cisaillement et la viscosité apparente. À ce stade de l'étude, les essais d'ouvrabilité nous ont permis de déterminer quelques propriétés relatives, impliquant le rôle joué par les additions minérales dans l'écoulement des pâtes cimentaires. Cependant, pour une étude plus approfondie, l'utilisation d'un rhéomètre et l'étude des suspensions en écoulement s'est avérée utile. L'étude rhéologique nous a permis de caractériser le comportement rhéologique de chaque écoulement et la mesure des différentes propriétés rhéologiques. De plus, des corrélations peuvent être déduites des deux approches, empirique et rhéologique. Différents enseignements ont été tirés.

L'augmentation du dosage en addition entraîne une augmentation de la concentration volumique en solides, ce qui induit un accroissement des propriétés rhéologiques telles que le seuil de cisaillement statique et la viscosité apparente.

En terme de corrélation, d'une manière générale, l'étalement est une fonction décroissante du seuil de cisaillement tandis que la viscosité plastique est une fonction croissante du temps d'écoulement et ce quelque soit la valeur du rapport E/L et du rapport C/A des mélanges. En effet, les deux programmes d'essais ont permis de conclure ce qui suit :

Pour les pâtes (sans AV et un SP fixé), une substitution de plus en plus grande de ciment par les additions a diminué l'étalement au mini cône, augmenté la viscosité et a modifié les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité) à la hausse.

L'introduction de l'agent de viscosité dans les différentes compositions n'a pas une grande influence sur les mesures empiriques et les mesures du rhéomètre.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre travail de thèse a porté sur le comportement rhéologique des pâtes cimentaires autoplaçantes sur lesquelles nous avons remplacé une partie de ciment par de la poudre de marbre issue d'un déchet d'une marbrerie de (Tizi Ouzou, Algérie), Le laitier granulé d'EL Hadjar (Annaba, Algérie) est utilisé par la cimenterie de Hadjar pour la production du CEM II 42,5.

La poudre de marbre est une poudre de récupération, issue des déchets d'une fabrique de produit de marbre, compte tenu de son abondance et de son prix à bon marché, cet ajout de poudre de marbre présente donc un intérêt économique certain.

L'emploi de ces matériaux comme addition au bétons autoplaçants en remplacement du ciment pour des raisons économiques intéressantes, permettant d'élargir le champ d'emploi du laitier et l'élimination des décharges des bouteilles de verre.

La présente recherche s'inscrit dans le cadre de l'exploitation des matériaux locaux, y compris les additions, pour la préparation des bétons autoplaçants économiques.

Les pâtes sont testées en présence d'un superplastifiant et d'un agent de viscosité. Deux programmes d'essais ont été menés : le premier en utilisant des essais empiriques plus simples et faciles à réaliser (essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement au cône de Marsh) pour mesurer l'étalement et le temps d'écoulement des pâtes ; le second en utilisant le rhéomètre HAAKE RHEOSTRESS 1 pour mesurer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des pâtes.

Sous la lumière des résultats des essais réalisés sur un ensemble de 760 compositions différentes il a été trouvé que :

Les demandes en eau et en superplastifiant des additions dépendent de leur nature et dosage. Ainsi le laitier granulé est caractérisé par des demandes en eau et en superplastifiant modérées par rapport la poudre de marbre et la poudre de verre.

L'incorporation du laitier granulé à un rapport de $C/LG = 2$ permet d'améliorer la fluidité des pâtes. Tandis que pour des valeurs supérieures (plus on met le laitier granulé), l'incorporation du laitier granulé provoque une altération de l'écoulement des mélanges.

L'incorporation de la poudre de marbre et la poudre de verre a un effet inversement proportionnel sur la fluidité des mélanges quelle que soit le dosage de ces poudres.

De tous les résultats obtenus, nous pouvons dire que les superplastifiants, par leur action de défloculation, ont une grande influence sur l'ouvrabilité. Plus le SP augmente plus l'écoulement de ces pâtes se rapproche de l'écoulement newtonien et ce grâce à l'effet dispersant de SP.

L'augmentation du dosage en addition entraîne une augmentation de la concentration volumique en solides, ce qui induit un accroissement des propriétés rhéologiques telles que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique quelle que soit la nature de l'addition.

En terme de corrélation, d'une manière générale, l'étalement est une fonction décroissante du seuil de cisaillement tandis que la viscosité plastique est une fonction croissante du temps d'écoulement et ce quelque soit la valeur du rapport E/L (eau/ciment + addition) et du rapport C/A (ciment/addition) des mélanges. En effet, les deux programmes d'essais ont permis de conclure ce qui suit :

Pour les pâtes (sans AV et un SP fixé), une substitution de plus en plus grande de ciment par les additions a diminué l'étalement au mini cône, augmenté la viscosité et a modifié les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité) à la hausse.

L'introduction de l'agent de viscosité dans les différentes compositions n'a pas une grande influence sur les mesures empiriques et les mesures du rhéomètre.

Perspectives

On se propose d'étudier la résistance mécanique en compression des différents mélanges, dans le but de mettre en évidence la contribution des additions minérales à l'amélioration des propriétés mécaniques de ces mélanges.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Okamura H., Ouchi M., "Self-Compacting Concrete. Development, present use and future", Proceedings of the First International RILEM Symposium on self- Compacting Concrete, Stockholm, Suède pp. 3-14, 1999.
- [2] Mokeddem. S, Contrôle de la rhéologie d'un béton et de son évolution lors du malaxage par des mesures en ligne à l'aide de la sonde Viscoprobe, thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2012.
- [3] Association Française de Génie Civil, « Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires », Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.
- [4] Okamura, H. et Ouchi, M. Self-compacting Concrete, Journal of advanced concrete technology, vol.1, p5-15. 2003.
- [5] Association française de Génie Civil, Recommandations provisoires pour l'emploi des Bétons Autoplaçants, Paris, 2ème édition, AFGC, 64 p. 2008.
- [6] Yahia et al., Effect of rheological parameters on self compactability of concrete containing various mineral admixtures, 1999, Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, Stockholm, pp 523-536.
- [7] Carlsward et al., Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 143-153.
- [8] de Larrard, Structures granulaires et formulation des bétons, Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 34.avril, 2000.
- [9] Jin, Properties of mortar for self-compacting concrete, PhD thesis de l'Université de Londres, 2002, 398 pages.
- [10] Association française de Génie Civil (AFGC), Bétons Auto-Plaçants Recommandations provisoires, juillet 2002, 63 pages.
- [11] Sandrine BETHMONT, mecanismes de segregation dans les betons autoplaçants (BAP), thèse de doctorat, de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005

- [12] Joumana Y, *Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques*, thèse de doctorat, cachan, 2007.
- [13] NEHDI M, "Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials", *Cement and Concrete Research*, Vol 30 pp 1603-1669, june 2000.
- [14] Yahia, A., Tanimura, M. et Shimoyama, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, *Cement and Concrete Research*, vol.35, n° 3, p.532-539. (2005).
- [15] El hilali A, E.ghorbel E, Gonnon P, "Influence des fillers sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants", Université de Cergy-Pontoise, France, 2005.
- [16] Zhu et Gibbs, Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, *Cement and concrete research*, vol 35, pp1457-1462. 2005.
- [17] Yahia, A., Tanimura, M. et Shimoyama, Y. (2005). Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, *Cement and Concrete Research*, vol.35, n° 3, p.532-539.
- [18] Park, Noh, Park, Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, *Cement and concrete research*, 2005, vol 35, pp 842-849.
- [19] Ferraris, Oble et Hill, Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cement and concrete research*, 2001, vol 31, pp245-255
- [20] Lee S. H., Kim H. J., Sakai E., Daimon M. (2003) : Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Volume 33, Issue 5, May, Pages 763-768.
- [21] Shi and al., A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1998, vol 20, pp 9-14.
- [22] Flatt R. J., Houst Y. F. (2001): *A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers*. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, p. 1169–1176.

- [23] Gallias JL., Kara-Ali R., Bigas JP., "The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes", *Cement and concrete research*, vol 30(10), pp.1543–9, 2000.
- [24] Ferraris, 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*, 1999, vol 104, n°5, pp461-478.
- [25] Flatt, Toward a prediction of superplasticized concrete rheology, *Materials and structures*, vol 37, pp 289-300. 2004.
- [26] Baron J. (1982) : *Le béton hydraulique*. Edité par Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Chapitre 6 « la structure des suspensions de ciment », p99-113.
- [27] Jolicoeur, M. A. Simard, « Chemical Admixture-Cement Interactions: phenomenology and Physico-chemical Concepts », *CCC Vol 20*, pp 87-101, 1998.
- [28] 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, 1995, 203 p.
- [29] Jianwei, DehuaDeng HaiHuang, QiangYuan, JianguoPeng, Influence of superplasticizer on the rheology of fresh cement asphalt paste, *Case Studies in Construction Materials* 3 9–18 (2015).
- [30] BENSEBTI S, Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux, thèse de doctorat, université mentouri constantine, 2005.
- [31] Sugamata, et al., A study of particle dispersion effect of polycarboxylate-based superplasticizers, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1999, vol 21, pp 7-14.
- [32] M. PHAN Trung Hieu, Rhéologie et Stabilité des pâtes de ciments utilisées dans la formulation des Bétons Fluides, thèse de doctorat, université de cachan 2007.
- [33] Hasni L. (1999) : Bétons autoplaçants – synthèse bibliographique. Rapport n°98-004/98006 CEBTP, 46pages.

- [34] Khayat et Yahia, Effect of Welan Gum – High Range Water Reducer Combinations on Rheology of Cement Grout, 1997, ACI Materials Journal, vol 94 n°5, Septembre-Octobre.
- [35] Andreas Leemann, Frank Winnefeld, “ The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete ”, Cement & Concrete Composites 29 (2007) 341–349.
- [36] Turcry P., Loukili A.: différentes approches pour la formulation associations des betons autoplaçants : incidence sur les caracteristiques rheologiques. FGC/AUGC/IREX. (2002)
- [37] Domone P., Xu Y. and Banfill P., "Developments of the Two-Point Workability Test for High-Performance Concrete", Magazine of Concrete Research vol. 51, 1999, pp. 181-190.
- [38] Utsi S, Emborg M, Carsward J, “Relation with workability and rheological parameters”, 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM publication SARL, P.311-22, 2003.
- [39] Projet National B.A.P., Aide à la rédaction de cahier des charges techniques pour le Bétons Auto-Plaçants (B.A.P.), Mars 2005.
- [40] Bétons Autoplaçants-Monographie d'ouvrages en B.A.P., B.52, collection technique CimBéton, 152 pages. 2003.
- [41] Collepardi et al, Laboratory-tests and field experiences of High-Performance SCCs, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande, pp 271-280. août 2003.
- [42] Okamura H., Ozawa K. « Mix design for self-compacting concrete. » concrete library of JSCE, n°25 juin 1995.
- [43] Oucief.H, les betons autoplaçants a fibrage mixte : leur reponse mecanique et bases de leur optimisation, thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2006
- [44] De Larrard F. et al, « prévision de la compacité des mélanges granulaires le modèle de suspension solide n°1- fondements théoriques et calibration du modèle », Bulletin du laboratoire central des ponts et chaussées n° 194, Nov-Dec 1994
- [45] Sedran T. « Les bétons autonivelants- Synthèse bibliographique », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 196, p53-60 Mars-Avril 1995.

- [46] Conrrazé G., Grossiord J.L. "Initiation à la rhéologie", Tec & Doc, 3ème édition. (2000).
- [47] Wallevik, J. E., Rheology of particle suspensions, Fresh concrete, mortar and cement paste with various types of lignosulfonates, Doctoral Thesis, February, 2003.
- [48] Benjamin H, Influence de la température sur la thixotropie des bétons autoplacants, thèse de doctorat, Université d'Artois, 2009.
- [49] Adjoudj.M. E et des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton, thèse de doctorat, Université hassiba benbouali de chlef, 2015.
- [50] Mouret, M. and Cyr., 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, No.11, pp.1901-1903, 2003.
- [51] Cyr M., Legrand C., Mouret M., "Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives", Cement and Concrete Research, 30, pp. 1477-1483,2000.
- [52] Hu C., de Larrard F., "The rheology of fresh high performance concrete", Cement and concrete research, vol. 26, 1996, pp. 283-294.
- [53] Haddadou. N, Elaboration et caractérisation de béton autoplacant fibré avec ajout de poudre de marbre, thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2015.
- [54] Projet Région "Amélioration des constructions par la maîtrise des BAP" Conseil Régional Midi-Pyrénées dans la thématique de recherche "l'homme et sa région", 131 p., 2005.
- [55] De Schutter « Guidelines for testing fresh self compacting concrete », European Research Project, 2005.
- [56] Hayakawa, M., Matsuoka, Y. et Shindoh, T. Development and application of super-workable concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop on Special Concretes: Workability and Mixing, Paisley, Scotland, p.183-190. (1993).
- [57] Bartos P.J.M., "Assessment of properties of underwater concrete by the Orimet test", Proceedings of the International RILEM workshop on Special Concretes

Workability and Mixing, Paisley, Ecosse, pp.191-200, 1993.

[58] RILEM. Self-Compacting Concrete, State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Edited by Skarendahl, A. et Petersson, O., RILEM Publications, France. (2001).

[59] Emborg, Rheology tests for self-compacting concrete-How useful are they for the design of concrete mix for full-scale production, Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, 1999, Stockholm, pp95-105.

[60] Ferraris, de Larrard, Testing and modeling of fresh concrete technology, NIST, 1998, février, NISTIR 6094, 61 pages.

[61] Esping, O. Early age properties of self-compacting concrete – effects of fine aggregate and limestone filler, Thesis of doctor of philosophy, University of Technology Göteborg, Sweden, (2007)., 204 p.

[62] Wallevik, O. H. Description of Fresh Concrete Properties by use of Two-Point Workability Test Instrument. M.Sc., The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, (1983)

[63] Phan, T.H., “Comportement thixotropique des pâtes de bétons auto-plaçants”, 24 ème Rencontres Universitaire de Génie civil, Vol. d, (2006)

[64] Husson S., "Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers", Application aux mortiers, thèse de Doctorat, ENSM Saint-Etienne et INP Grenoble, mars 1991,166p.

[65] Khayat, K. H. Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials - an overview. Cement and Concrete Composites, volume 20, numéro 2, p. 171-188, (1998).

[66] Claude Bedard, P.E. and Mailvaganam, N.P. “The Use of Chemical Admixtures in Concrete. Part II: Admixture-Admixture Compatibility and Practical Problems”, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 20, pp. 2–5, (2006).

[67] Étienne. C, rhéologie des bétons frais à base de ciment d'aluminates de calcium, thèse de doctorat, université laval, québec, 2012.

[68] Girish, S., Ranganath, R.V. and Vengala, J., “Influence of powder and paste on flow

properties of SCC”, Construction and Building Materials, Elsevier Ltd, Vol. 24 No. 12, pp. 2481–2488. (2010).

[69] Westerholm M. Rheology of the Mortar Phase of Concrete with Crushed Aggregate, Luleå University of Technology. (2006).

[70] Siddique, R., Aggarwal, P. and Aggarwal, Y., “Influence of water / powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash”, Construction and Building Materials, Elsevier Ltd, Vol. 29, pp. 73–81. (2012).

[71] Neville, A.M. Properties of Concretes, 4th edition, Ad Wes Lon Higher edition, 864 p. (1996).

[72] Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W.C., MacLeod, N.F. and McGrath, R.J., Dosage et contrôle des mélanges de béton, montréal, Associati. (2004)

[73] C.K. Park, M.H. Noh, T.H. Park, Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, Cement and Concrete Research (2004).

[74] Natallia Shanahan, Victor Tran, Andrew Williams, A. Zayed, Effect of SCM combinations on paste rheology and its relationship to particle characteristics of the mixture, Construction and Building Materials, 123, 745-753. (2016).

[75] Alireza. K , Rackel. S, Greg G. Q, Jannie S.J, John L. P, Modelling the yield stress of ternary cement–slag–fly ash pastes based on particle size distribution, Powder Technology, 266, 203-209, (2014).

[76] S. Clayton, T.G. Grice, D.V. Boger, « Analysis of the slump test for on site yield stress measurement of mineral suspensions », International journal of mineral proceeding 70 pp 3-21 2003.

[77] Aissoun, B. M.. Étude de l'influence des caractéristiques des granulats sur la performance des bétons fluides à rhéologie adaptée. M.Sc.A., Université de Sherbrooke, Sherbrooke, (2011).

[78] Koehler, E. P., Fowler, D. W. Aggregates in self-consolidating concrete. International Center for Aggregates Research, Austin, TX., 362 p. (2007).

[79] Jiong.H, Kejin.W, Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology, Construction and Building Materials,(25), 1196-1204, 2011.

- [80] Topçu I B, Bilir T, Uygunoglu T, “Effect of waste marble dust content as filler on properties of selfcompacting concrete”, *Construction Building Materials*, 23(5): 1947–53, 2009 .
- [81] Guneyisi E, Gesoglu M, Ozbay E, “Effects of marble powder and slag on the properties of self-compacting mortars”, *Materials and Structures*, 42: 813–26, 2009.
- [82] Ergun A, “Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete”, *Construction and Building Materials*, 25: 806–12, 2011.
- [83] Aruntas h Y, Guru m, Dayi M, Tekin I, “Utilization of waste marble dust as an additive in cement production”, *Materials and Design*, 31: 4039-42, 2010.
- [84] Wentzell, J. Evaluation of the potential use of glass powder as a pozzolanic material, Rapport de stage, Sherbrooke, Quebec, Canada. (2006).
- [85] Schwarz, N. et Neithalath, N. Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration, *Cement and Concrete Research*, vol.38, n° 4, p.429-436. (2008a).
- [86] Idir, R. Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique, Thèse de doctorat en cotutelle, INSA de Toulouse, France – l’Université de Sherbrooke, Canada. (2009).
- [87] Behim, M., Cyr, M. et Clastres, P. Physical and chemical effects of El-Hadjar slag used as an additive in cement-based materials, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol.15, n° 10, p.1413-1432. (2011).
- [88] T. 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, thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2014.
- [89] El barrak M. « Contribution à l’étude de l’aptitude à l’écoulement des bétons autoplacants à l’état frais », Thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, France. (2005).
- [90] Diederich, P., Mouret, M., De ryck, A., Ponchon, F. et Escadeillas, G. The nature of limestone filler and self-consolidating feasibility-Relationships between physical,

chemical and mineralogical properties of fillers and the flow at different states, from powder to cement-based suspension, Powder Technology, vol.218, p.90-101. (2012).

[91] Michel, F., Pierard, J., Courard, L. et Pollet, V. Influence of physic-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances, Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC, Ghent, Belgium, p205-210. (2007).

[92] Lecomte, A., Mechling, J. M et Diliberto, C. Indice de ségrégation des pâtes de consistance normale, 7ème édition des journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, Toulouse, France. (2006).

[93] Aïtcin, p.C. Bétons haute performance, Paris, 1er Edition, Eyrolles, 683 p. (2001).

[94] Ferraris, C.-F., Obla, K.-H. and Hill, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, Cement and concrete researchs, Vol. 31, pp 245-255. (2001).

[95] Park, C.-K., Noh, M.-H. and Park, T.-H., Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, ", Cement and concrete researchs, Vol 35, pp 842-849. (2005).

[96] T.h. phan, M. Chaouche and M. Moranville: "Influence of organic admixtures on the rheological behaviour of cement pastes", Cement & Concrete Research 36 (10) 1807-1813. (2006)

[97] R. Bouras, Rhéologie des pâtes cimentaires pour bétons autoplaçants, thèse de doctorat, Université de Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2011.

[98] Mansour, M. S., Abadlia, M.T. and Bekkour, K. Effect of pozzolan on the rheological behavior of cement pastes, mechanical Journal of Applied and Theoretical, Vol.2, n° 3, p.255-263. (2010).

[99] J. plank, ch. Hirsch, Superplasticiser Adsorption on Synthetic Ettringite, In proceedings of 7th CANMET /ACI Conference on Superplasticizers in Concrete , Berlin ,Germany, vol.217 , pp283-298. (2003).

[100] Griesser, A., Jakobs, F., Hunker, F. Influence of different Superplasticizers on the rhéological properties of mortars. Proc. Of the international 0 7277 3407 5. (2005).

- [101] Safi B., Benmounah A., LI A., Yurdas I., Using the silt (clay) of dams in self compacting concrete (SCC) : publication congrès avec un acte et proceeding édité ; 22nd World mining congress 11- 16 September / Istambul. (2011).
- [102] G. lim, ss. Hong, D.S. Kim, B.J .Lee, J.S. Rho. Slump loss control of cement paste by adding polycarboxylic type slump releasing dispersant, cement and concrete Research vol. 29 (2) pp 223-229. (1999).
- [103] Saak, A. W., Jennings, H. M. Et shah, S. P. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow, Cement and Concrete Research, vol.34, n° 3, p.363-371. (2004).
- [104] N. Roussel, C. Stefani, ET R. Leroy, « From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement based materials yield stress using slump tests », Cement and Concrete Research, p. 817 - 822, 2005.
- [105] Schwartzentruber, L., Le roy, R. et cordin, J. Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a self-compacting concrete (SCC), Cement and Concrete Research, vol.36, n° 7, p.1203-1213. (2006).
- [106] Diederich, P. Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaire sur le comportement autoplaçant du béton. Thèse de doctorat INSA, Toulouse, France. (2010).