

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCCEN
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MEMOIRE DE MASTER

SPECIALITE : GENIE CIVIL

OPTION : INGENIERIE DES STRUCTURES

Thème:

ETUDE RHEOLOGIQUE DE L'INTERACTION ENTRE LES
ADDITIONS MINERALES ET ORGANIQUES SUR DES MORTIERS

Présenté par :

MESLI Imene Fatema Zohra
CHARIF Ikram Fadya

Soutenu le 24-05-2016 devant le jury composé de

M ^r Z.E.A. CHERIF	MAA	Univ. Tlemcen	Président
M ^r A. BAGHLI	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^r F. HOUTI	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur
Dr M.A. BOUKLI HACENE	MCA	Univ. Tlemcen	Encadreur
M ^r O. TALEB	MAA	Univ. Tlemcen	Encadreur

A mes parents

A mon mari

A mes frères et sœurs

A ma belle mère

A tous mes amis

Charif Ikram Fadya

A mes parents

A ma grand mere

A mes frères et sœurs

A tous mes amis

Mesli Imene Fatima Zohra



REMERCIEMENTS



*Nous remercions **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent travail.*

Qu'il nous soit permis de remercier du fond du cœur certaines personnes qui ont eu à contribuer de près ou de loin à réaliser ce travail ; et qui de leur amour nous ont donné les ressources nécessaires pour accomplir nos rêves.

*Nous tenons tout d'abord à remercier chaleureusement nos encadreurs **Mr TALEB Omar** et **Dr BOUKLI HACENE Sidi Mohammed El Amine** qui, malgré leurs occupations professionnelles, ont accepté sans réserve, de diriger ce travail. Ils se sont grandement impliqués non seulement par leurs directives, remarques et suggestions, mais aussi par leurs encouragements. Nous leurs sommes profondément reconnaissantes.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos gratitudees à **Mr CHERIF Zine -El- Abidine** qui à accepter d'honorer la présidence de ce jury.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements à **Mr HOUTI Farid** et **Mr BAGHLI Abdellatif** pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner ce modeste travail.*

*Nous adressons nos profondes gratitudees à l'ensemble des enseignants du département de Génie civil en particulier **Mr GHOMARI Fouad**, **Mr ALLAL Amine** et **Mr BEZZAR Abdelillah**.*

*Nos remerciements s'adressent également à tous ceux et celles qui nous ont aidé à la réalisation de ce modeste travail, en particulier **Melle BELAIDI Amina**, **Mr BRIXI Abderrahim** et **Mr Soualem Toufik**.*

*Nous tenons à remercier aussi toute l'équipe du laboratoire particulièrement **Mr Hennaoui Mustapha** et **Hakim**.*

RESUME



Il est nécessaire d'utiliser les superplastifiants pour réduire la quantité d'eau de gâchage et ceci dans le but d'améliorer les performances mécaniques et rhéologiques des mortiers et des bétons.

L'efficacité du superplastifiant dépend de sa concentration, du rapport E/C, du type du ciment et de la présence des additions minérales.

En effet, l'incorporation des additions minérales provoque des changements dans la distribution granulaire qui modifie significativement le comportement rhéologique des mélanges.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'interaction entre les superplastifiants et certaines additions minérales sur les propriétés rhéologiques des mortiers.

Mots clés : Mortier, rhéologie, viscosité, superplastifiant, additions organiques.

ABSTRACT



It is required to use the superplasticizers reduce the amount of mixing water this in order to improve the mechanical and rheological performance of mortars and concretes.

The effectiveness of superplasticizer depends on its concentration, w / c ratio, cement type and the presence of mineral additions.

Indeed, the incorporation of mineral additives causes changes in granular distribution which greatly modifies the rheological behavior of mixtures.

The aim of this study is to evaluate the interaction between superplasticizers and some mineral additives on the rheological properties of mortars.

Keywords: Mortar, rheology, viscosity, superplasticizer, organic additions .

الملخص



إنّ استخدام الملدنات ضروري لتقليل كمية الماء و تحسين الأداء الميكانيكي للخرسانة. إنّ فعالية الملدنات تعتمد خاصة على تركيزهم بالنسبة للاسمنت. من ناحية أخرى فإن المضافات المعدنية تسبب تغيرات في صلب الخرسانة قد تؤدي في بعض الأحيان إلى تغيير لزوجة الخليط تنتج عليه صعوبة في وضع هذا الأخير في القوالب.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم التفاعل بين الملدنات و المضافات المعدنية على الخواص الريولوجية و الميكانيكية للملاط.

الكلمات المفتاحية : الملاط ، الريولوجيا ، لزوجة ، الملدنات، المضافات المعدنية.

SOMMAIRE

RESUME

ABSTRACT

الملخص

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS	xii
INTRODUCTION GENERALE.....	1

Chapitre 1 : Notions de bases de la rhéologie

I. Introduction à la rhéologie.....	3
II. Notion des fluides.....	3
II.1. Les fluides newtoniens.....	3
II.2. Les fluides non newtoniens.....	4
II.3. Fluide thixotrope.....	5
III. Les paramètres rhéologiques.....	6
III.1. Concentration volumique solide ϕ	6
III.2. Indice des vides, porosité.....	7
III.3. Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ [S^{-1}].....	8
III.4. Contrainte de cisaillement τ [pa].....	9
III.5. Seuil de cisaillement	9
III.5.1. Le seuil de cisaillement statique.....	9
III.5.2. Le seuil de cisaillement dynamique.....	9
III.6. La viscosité.....	10
III.6.1. La viscosité dynamique.....	10
III.6.2. La viscosité cinématique.....	10
IV. Le comportement rhéologique.....	10
Les références bibliographiques.....	13

Chapitre 2 : Influence des additions sur la rhéologie des matériaux granulaires.

I. Introduction.....	15
II. Paramètres modifiants la rhéologie.....	15
II.1. Influence des additions organiques	15
II.1.1. Type de superplastifiant.....	15
II.1.1.1. Les lignosulfonates modifiés (LM).....	15
II.1.1.2. Les poly naphthalènes sulfonâtes (PNS) et poly mélanines sulfonâtes (PMS)	16
II.1.1.3. Les polycarboxylates	17
II.1.1.4. Les sulfonâtes ethoxyles.....	18
II.1.2. Mode d'action des superplastifiants.....	18
II.1.2.1. Adsorption.....	18
II.1.2.2. Défloculation par répulsion électrostatique.....	18
II.1.2.3. Dispersion par effet stérique.....	19
II.1.3. Effet des superplastifiants sur la rhéologie.....	19
II.1.3.1. Effet du mode d'introduction.....	19
II.1.3.2. Effet de la nature du superplastifiant.....	20
II.1.3.3. Effet du dosage en superplastifiant.....	22
II.1.3.4. Effet des réducteurs d'eau.....	22
II.1.3.5. Effet des agents entraîneurs d'air.....	22
II.1.3.6. Effet des agents de viscosité.....	22
II.2. Influence des additions minérales	23
II.2.1. Type d'additions minérales.....	23
II.2.2. Effet des fillers calcaires.....	27
II.2.3. Effet de la pouzzolane.....	31
II.2.4. Effet de la fume de silice.....	31
II.2.5. Effet des cendres volantes.....	35
II.2.6. Effet des laitiers hauts fourneaux.....	37
II.3. Autres paramètres influant sur la rhéologie.....	39
II.3.1. Effet du rapport E/C.....	39
II.3.2. Effet de la nature du ciment.....	40
II.3.3. Effet des fibres.....	41

II.3.4. Effet du temps.....	41
II.3.5. Effet de la température.....	42
II.3.6. Effet du malaxage.....	42
II.3.7. Effet de la vibration.....	42
III. Phénomènes perturbateurs.....	43
III.1. Dimension du rhéomètre.....	43
III.2. Glissement aux parois.....	43
III.3. Evaporation.....	43
IV. Référence bibliographiques	44

Chapitre 3 : Matériaux et méthodes

I. Caractérisation des matériaux	51
I.1.Sable.....	51
I.1.1. Les caractéristiques physiques du sable.....	51
I.1.2. Analyse granulométrique.....	51
I.2.Le ciment.....	53
I.3.Les additions minérales.....	55
I.4.Les addition organiques.....	55
II. Composition des mortiers.....	55
III. Démarche méthodologiques.....	58
III.1. Essai au mini cône.....	58
III.2. Essai au rhéomètre.....	58
III.3. Différentes étapes d'un essai rhéologique.....	62
III.4. Mesure des paramètres rhéologiques	64
IV. Essai de la résistance mécanique.....	65
IV.1. Confection des éprouvettes prismatiques.....	65
IV.2. Essai de compression et traction par flexion.....	65
V. les références bibliographiques.....	67

Chapitre 4 : Résultats et discussions

I. Les essais d'affaissement.....	67
I.1. Combinaison fillers calcaires/éther polycarboxylique, polycarboxylate.....	67
I.2. Combinaison pouzzolane/éther polycarboxylique, polycarboxylate.....	69
I.3. Combinaison poudre de marbre / éther polycarboxylique, polycarboxylate.....	71
II. Le seuil de cisaillement.....	72
II.1. Combinaison fillers calcaires /éther poly carboxylique, polycarboxylate.....	72
II.2. Combinaison pouzzolane / éther poly carboxylique, polycarboxylate.....	73
II.3. Combinaison poudre de marbre /éther polycarboxylique, polycarboxylate.....	74
III. La viscosité plastique.....	75
III.1. Combinaison fillers calcaires / éther polycarboxylique, polycarboxylate.....	75
III.2. Combinaison pouzzolane /éther poly carboxylique, polycarboxylate.....	76
III.3. Combinaison poudre de marbre / éther poly carboxylique, polycarboxylate.....	77
IV. Les résistances.....	78
IV.1. Combinaison fillers calcaires /éther poly carboxylique.....	78
IV.2. Combinaison fillers calcaire /polycarboxylate.....	79
IV.3. Combinaison pouzzolane/éther poly carboxylique.....	80
IV.4. La résistance à la compression polycarboxylate/pouzzolane.....	80
IV.5. Combinaison poudre de marbre /éther poly carboxylique, polycarboxylate.....	82
V. Conclusion.....	83
VI. Références bibliographiques.....	84

Chapitre 5 : Modélisation

I. Introduction.....	85
II. Modèles relatifs aux seuils de cisaillement.....	85
II.1. Combinaison fillers/SP1.....	85
II.2. Combinaison fillers/SP2.....	87
II.3. Combinaison pouzzolane/SP1.....	88

II.4. Combinaison pouzzolane/SP2.....	90
II.5. Combinaison poudre de marbre/SP1.....	91
II.6. Combinaison poudre de marbre/SP2.....	93
III. Modèles relatifs à la viscosité.....	94
III.1. Combinaison fillers /SP1.....	94
III.2. Combinaison fillers /SP2.....	96
III.3. Combinaison pouzzolane/ SP1.....	97
III.4. Combinaison pouzzolane/SP2.....	99
III.5. Combinaison poudre de marbre/SP1.....	100
III.6. Combinaison poudre de marbre/polycarboxylate.....	102
IV. Modèles relatifs à la résistance mécanique.....	103
IV.1. Combinaison fillers /éther poly SP1.....	103
IV.2. Combinaison fillers/SP2.....	105
IV.3. Combinaison pouzzolane/SP1.....	106
IV.4. Combinaison pouzzolane/SP2.....	108
IV.5. Combinaison poudre de marbre/SP1.....	109
IV.6. Combinaison poudre de marbre/SP2.....	111
V. Conclusion.....	112
 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	 113

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Les différents types d'écoulement de la matière.....	4
Figure 1.2 : Exemple des courbes d'écoulement.....	6
Figure 1.3 : Schéma de la vitesse de cisaillement.....	8
Figure 1.4 : Schéma des glissements des courbes.....	10
Figure 1.5 : Contribution de la phase solide et la phase liquide a la résistance au cisaillement du béton.....	12
Figure 1.6 : Représentation graphique du modèle de Bingham.....	12
Figure 2.1 : Structure des lignosulfate modifiés LSM.....	16
Figure 2.2 : Structure chimique des poly mélanines sulfonâtes PNS.....	16
Figure 2.3 : Structure chimique des poly mélanines sulfonâtes PMS.....	17
Figure 2.4 : Structure chimique des polycarboxylate PC.....	17
Figure 2.5 : Les sulfonâtes ethoxyles.....	18
Figure 2.6 : Schéma de la structure d'une pâte de ciment a) floculée (sans superplastifiant) b) défloculée (avec superplastifiant)	19
Figure 2.7 : Effet du temps d'introduction des superplastifiants sur les paramètres rhéologiques.....	20
Figure 2.8 : Effet du superplastifiant sur les propriétés rhéologiques des mortiers sans additions minérales.....	21
Figure 2.9 : Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton.....	25
Figure 2.10 : Besoin en eau des mortiers CEM.II addition non adjuvanté en fonction du dosage en additions minérales.....	26
Figure 2.11 : Illustration de l'effet filler.....	27
Figure 2.12 : Évolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique de l'addition minérale.....	28
Figure 2.13 : Relation entre la demande en eau d'un filler et sa surface spécifique BET.....	29
Figure 2.14 : Temps d'écoulement au V-funnel en fonction du pourcentage de fillers calcaires.....	30

Figure 2.15: Effets de la fumée de silice sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.....	32
Figure 2.16 : Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier.....	33
Figure 2.17 : Comparaison entre la distribution granulaire du ciment et de la fumée de silice.....	34
Figure 2.18. Effet de la teneur de la fumée de silice sur la compacité.....	34
Figure 2.19 : Effet de la teneur de la fumée de silice sur la viscosité.....	35
Figure 2.20 : Effet de la cendre volante sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.....	36
Figure 2.21 : Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes 1 et 2 dans une formulation de béton pour une même consistance.....	37
Figure 2. 22 : L'influence du laitier à haut fourneau et les fractions fines dans le ciment (C1) sur la viscosité plastique des pâtes avec et sans superplastifiant.....	38
Figure 2.23: Effets du laitier des hauts fourneaux sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.....	39
Figure 2.24 : Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons.....	40
Figure 2.25 : Effet de C ₃ A et de SO ₃ sur le seuil de cisaillement.....	41
Figure 2.26: Variation de g et h avec le temps sur des bétons faiblement fluidifiés , composés de différents liants et à 20° C	42
Figure 3.1. Courbe granulométrique du sable.....	53
Figure 3.2. Illustration du mini cône.....	58
Figure 3.3. Dispositif de l'essai rhéologique.....	59
Figure 3.4. Illustration de la pale et du récipient du rhéomètre.....	59
Figure 3.5. Evolution du couple et de la vitesse de rotation en fonction du temps.....	60
Figure 3.6. Evaluation du couple en fonction de la vitesse.....	63
Figure 3.7. Evaluation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.....	63
Figure3.8. Eprouvettes prismatiques des mortiers.....	65
Figure 3.9. Dispositif d'essais d'écrasement.....	66
Figure 3.10. Dispositif d'essais d'écrasement.....	66
Figure 4.1 : Représentation de l'affaissement d'un mortier préparé avec des fillers calcaires (Sans adjuvant)	67

Figure 4.2 : Etalement des mortiers avec filler (a) combiné à l'éther Poly carboxylique (b) combiné au polycarboxylate.....	68
Figure 4.3 : Variation de l'affaissement en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants à base d'éther poly carboxylique.....	68
Figure 4.4 : Variation de l'affaissement en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants à base de polycarboxylate.....	69
Figure 4.5 : Mortier avec filler.....	69
Figure 4.6 : Mortier avec pouzzolane.....	69
Figure 4.7 : Variation de l'affaissement en fonction des taux de la pouzzolane et des superplastifiants à base d'éther poly carboxylique.....	70
Figure 4.8 : Variation de l'affaissement en fonction des taux de pouzzolane et des superplastifiants à base de polycarboxylate.....	70
Figure 4.9 : Variation de l'affaissement en fonction des taux de la poudre de marbre et des superplastifiants à base d'éther poly carboxylique.....	71
Figure 4.10 : Variation de l'affaissement en fonction des taux de la poudre de marbre et des superplastifiants à base de polycarboxylate.....	72
Figure 4.11 : Variation du seuil de cisaillement en fonction des fillers calcaires et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate.....	73
Figure 4.12 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la pouzzolane et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate.....	74
Figure 4.13 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la poudre de marbre et des superplastifiants (a) avec éther polycarboxylique (b) avec polycarboxylate.....	75
Figure 4.14 : Variation de la viscosité en fonction des fillers calcaires et des superplastifiants (a) avec éther polycarboxylique (b) avec polycarboxylate.....	76
Figure 4.15 : Variation de la viscosité en fonction de la pouzzolane et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate.....	77
Figure 4.16 : Variation de la viscosité en fonction de la poudre de marbre et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate.....	78
Figure 4.17 : La résistance à la compression en fonction des fillers et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate.....	79
Figure 4.18 : La résistance à la flexion en fonction des fillers et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate.....	80

Figure 4.19 : Résistance à la compression en fonction de la pouzzolane et les superplastifiants (a)avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate.....	81
Figure 4.20 : Résistance à la flexion en fonction de la pouzzolane et les superplastifiants (a)avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate.....	81
Figure 4.21 : Résistance à la compression et en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants (a) éther poly carboxylique (b) polycarboxylate.....	82
Figure 4.22 : Résistance à la traction par flexion et en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants (a) éther polycarboxylique (b) polycarboxylate.....	83
Figure 5.1. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils expérimentaux.....	86
Figure 5.2. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils expérimentaux.....	87
Figure 5.3. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils expérimentaux.....	89
Figure 5.4. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils expérimentaux.....	90
Figure 5.5. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils expérimentaux.....	92
Figure 5.6. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils expérimentaux.....	93
Figure 5.7 : Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales.....	95
Figure 5.8. Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales.....	96
Figure 5.9. Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales.....	98
Figure 5.10. Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales.....	99
Figure 5.11. Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales.....	101
Figure 5.12. Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales.....	102

Figure 5.13. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales.....	104
Figure 5.14. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales.....	105
Figure 5.15. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales.....	107
Figure 5.16. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales.....	108
Figure 5.17. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales.....	110
Figure 5.18. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales.....	111

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Comportement rhéologique des fluides [Sheinn, 2002 ; Nehdi, 2004 ; Amziane, 2005].....	5
Tableau 3.1. Caractéristiques physiques du sable.....	51
Tableau 3.2. Analyse granulométrique du sable.....	52
Tableau 3.3. Composition chimique du ciment (%) (SCIBS, 2014).....	53
Tableau 3.4. Composition minéralogique du ciment (%) (SCIBS, 2014).....	54
Tableau 3.5. Propriétés physico – mécaniques du ciment (SCIBS).....	54
Tableau 3.6. Les compositions des différents mortiers avec le superplastifiant à base d'éther carboxylique.....	56
Tableau 3.7. Les compositions des différents mortiers avec le superplastifiant à base de polycarboxylate.....	57
Tableau 3.8. Profil de vitesse adopté pour les essais rhéologiques sur mortier.....	61

LISTE DES NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS

τ : la contrainte de cisaillement.

μ : la viscosité plastique.

$\dot{\gamma}$: le taux de cisaillement.

τ_0 : le seuil de cisaillement.

Φ : concentration volumique solide.

V_S : Volume solide.

V_V : Volume des vides.

ρ_C : la densité du ciment.

ρ_a : la densité de l'addition.

P : le taux de substitution massique du ciment par un autre composant.

$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ est le poids volumique de l'eau.

γ_s : le poids volumique de la fraction solide.

e : indice des vides.

n : la porosité.

ν : Viscosité cinématique.

ρ : la densité du fluide.

dS : surface élémentaire d'une couche cisillée.

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

Ω : la vitesse de rotation de la pale.

C : dosage en ciment.

M : le couple total appliqué sur le béton.

M_0 : le couple à l'origine (frottement intrinsèque de l'agitateur).

R_b : le rayon de la pale

R_r : le rayon du récipient.

h : la hauteur de la pale.

R_t : la résistance en flexion, en Méga Pascals (Newtons par millimètre carré).

F : la charge maximale, en Newtons.

L : l'écartement entre les deux rouleaux d'appui, en millimètres.

d : est la dimension de la section transversale de l'éprouvette, en millimètres.

R_c : est la résistance en compression, en Méga Pascals (Newtons par millimètre carré).

V_{mes} : la valeur expérimentale.

$V_{modèle}$: la valeur calculée par le modèle.

n: est le nombre de mesure pris en compte dans l'ajustement.

R^2 : Coefficient de détermination.

P : Probabilité.

$CaCO_3$: carbonate de calcium.

BAP: Béton autoplaçant.

SiO_2 :Oxyde de silicium.

mse : erreur quadratique moyenne

SP1 : superplastifiant à base d'éther polycarboxylique.

SP2 : superplastifiant à base de polycarboxylate.

INTRODUCTION GENERALE

La formulation des matériaux cimentaires (mortiers et bétons) qui a été reposé pendant très longtemps sur une simple association ternaire entre le ciment, les granulats et l'eau, s'est vu rapidement développée au cours de ces dernières décennies avec l'apparition de nouveaux matériaux innovants améliorant largement les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des mélanges granulaires.

En parallèle, le temps au cours duquel le mortier ou le béton reste frais et maniable est négligeable par rapport à sa durée de vie totale. Pourtant, au cours de ces quelques heures, beaucoup d'opérations s'effectuent : transport, mise en place, serrage. Ces opérations sont généralement fonction des paramètres rhéologiques des mélanges granulaires et influent significativement sur la qualité et la résistance de l'ouvrage. Ainsi, l'étude du comportement rhéologique des matériaux granulaires présente un grand intérêt industriel.

Par ailleurs, si les additions minérales ou organiques ont toujours montré séparément leur effet bénéfique sur la formulation finale à l'état frais et durci, le choix du type et de la combinaison entre ces dernières a souvent créé des surprises qui ont abouti parfois à des désordres considérables sur le plan de la ségrégation, ressuage, résistance mécanique, etc...

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude du comportement rhéologique des mortiers où le ciment ordinaire est combiné avec différents types d'additions minérales (fillers calcaires, pouzzolane, poudre de marbre). En plus, nous avons choisi de tester deux types de superplastifiants de deuxième et troisième génération à savoir l'éther polycarboxylique et le polycarboxylate afin d'évaluer l'effet de la combinaison additions organiques/minérales sur le comportement rhéologique et mécanique du mortier.

Notre mémoire comporte cinq chapitres. Le premier est destiné à l'étude bibliographique dans lequel nous avons rappelé les notions de base de la rhéologie.

Le deuxième chapitre est destiné à une revue bibliographique sur l'influence des additions minérales et des adjuvants chimiques sur le comportement rhéologique des matériaux cimentaires.

Le troisième chapitre englobe la caractérisation des matériaux et présente aussi une description détaillée des démarches expérimentales.

Le quatrième chapitre rassemble les résultats obtenus du travail expérimental tout en intégrant les interprétations nécessaires relatives aux résultats.

Dans le dernier chapitre, nous nous sommes intéressées à un travail de régression multiple dans lequel nous avons présenté des modèles mathématiques qui peuvent être utilisés dans la pratique.

Une conclusion générale regroupe les principaux résultats de notre étude.

Chapitre I



Notions de base de la rhéologie

Résumé

Dans ce chapitre de bibliographie, nous allons mettre en évidence la définition de la rhéologie. Ensuite, nous allons présenter quelques types de fluides et leurs notions de base. Aussi, nous allons définir les paramètres rhéologiques tels que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Sommaire du chapitre 1

I.	Introduction à la rhéologie.....	3
II.	Notions de fluide.....	3
III.	Les paramètres rhéologiques.....	6
IV.	Le comportement rhéologique.....;	10
	Références bibliographiques.....	13

I. Introduction à la rhéologie :

La rhéologie est un mot qui vient du grec **rhéo** et **logos** qui veulent dire respectivement couler et étude. Le mot ‘Rhéology’ a été créé par Eugène Cook Bingham en 1928, emprunté de l’expression grecque ‘Ta Panta Rei’ en français ‘tout s’écoule’. Il a été francisé en 1943. [Encyclopidia Universalis].

La rhéologie décrit les relations entre les contraintes et les déformations d’un élément de volume, compte tenu, le cas échéant, de leur dérivée par rapport au temps. La rhéologie est donc la science qui étudie les déformations et l’écoulement de la matière et plus généralement la viscosité des matériaux sous l’action des contraintes. Cette dernière a pour objet d’analyser le comportement mécanique des substances et d’établir leurs lois de comportement. On dit qu’un élément est en écoulement si le degré de déformation change en fonction du temps. Le comportement rhéologique d’un élément de volume d’un corps est la manière dont ces déformations correspondent aux contraintes imposées sur ce corps. Le but de l’étude du comportement rhéologique d’un fluide est d’estimer le système de forces nécessaires pour causer une déformation spécifique, ou la prédiction des déformations causées par un système de force spécifiques.

Un fluide peut avoir un comportement plastique ou viscoplastique si l’écoulement n’intervient qu’une fois dépasser un certain seuil pour les contraintes. Si la vitesse d’écoulement est proportionnelle aux contraintes de cisaillement, on dit que le fluide est visqueux. En deçà de ce seuil, le fluide ne s’écoule pas mais pour le cas échéant, il se déforme de manière élastique.

II. Notions de fluide :

II.1. Les fluides newtoniens.

Un fluide est dit newtonien lorsque sa viscosité ne dépend ni de sa vitesse de cisaillement, ni du temps pendant lequel le liquide est cisailé. La plupart des fluides usuels (eau, huile, jus non concentré, lait...) sont des fluides newtoniens. Le fluide newtonien est décrit par la loi suivante :

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

Où :

τ : la contrainte de cisaillement[Pa]

μ : la viscosité[Pa. s]

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

II.2. Les fluides non-newtoniens.

Un fluide est dit non newtonien lorsque le tenseur des contraintes visqueuses n'est pas une fonction linéaire du tenseur des taux de déformation. Il existe de nombreux comportements dans la famille des fluides non-newtoniens : les fluides à seuil, les rhéofluidifiants, les rhéoépaississants, etc... [Coussot, 2002].

Le fluide à seuil est défini par un rhéogramme présentant une contrainte critique appelée seuil d'écoulement ou seuil de cisaillement. Le seuil de cisaillement représente la contrainte minimale qu'il faut appliquer sur le fluide pour avoir un écoulement. Au-delà du seuil de cisaillement, le fluide à seuil peut avoir un comportement plastique comme les fluides de Bingham ou un comportement rhéofluidifiant ou rhéoépaississant comme les fluides de Herschel-Bulkley (Figure 1.1).

Le rhéofluidifiant, appelé pseudo-plastique est représenté par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le bas. Pour ces fluides la viscosité décroît lorsque le cisaillement augmente. Ainsi, le liquide devient moins visqueux et donc plus fluide lorsque le cisaillement augmente.

Le rhéoépaississant, appelé dilatant, est représenté par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le haut. Ainsi, le liquide devient plus visqueux et donc plus épais lorsque le cisaillement augmente.

Les rhéogrammes et les lois de comportement de ces fluides sont consignés dans la figure 1.1.

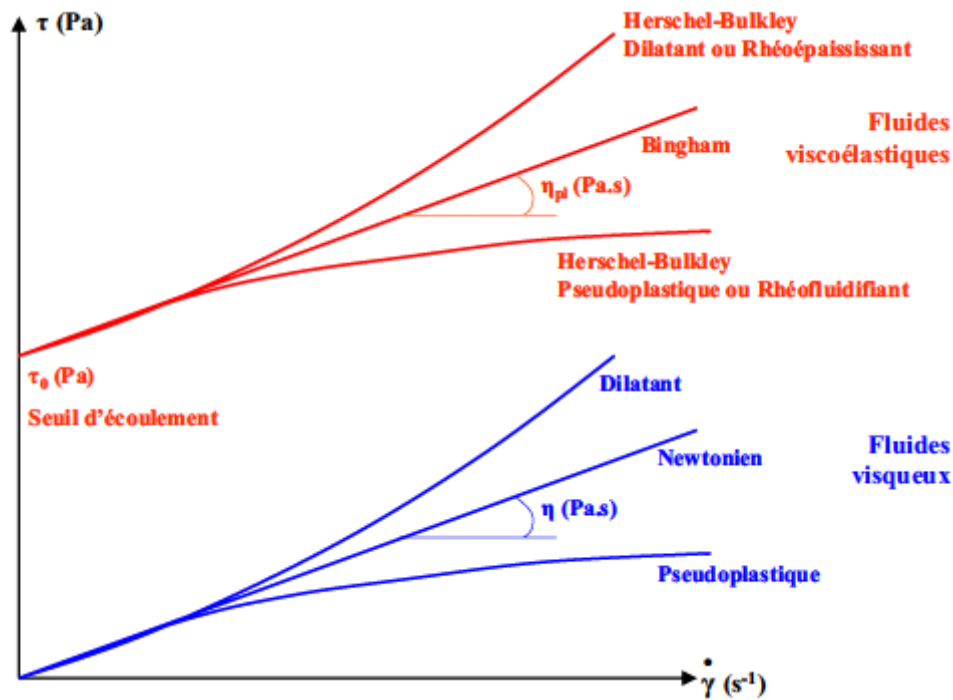


Figure 1.1. Les différents types d'écoulement de la matière [Edwige Nicolas, 2010].

Plusieurs chercheurs ont ajusté les modèles rhéologiques de base pour les calibrer avec leurs fluides étudiés. Les modèles de comportement rhéologique des fluides sont consignés dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1. Comportement rhéologique des fluides [Sheinn, 2002; Nehdi, 2004; Amziane, 2005].

Auteurs	Lois de comportement	Références
Newton [1687]	$\tau = \mu\dot{\gamma}$	[Hu, 95]
Bingham [1922]	$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$	[Tattersall, 76 ^(a)]
Herschel-Bulkley [1926]	$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$	[Atezeni85 ^(b)]
Ostwald [1925]	$\tau = A\dot{\gamma}^n$	[Atezeni, 83 ^(a)]
Von-Berg et Ostwald-de-Waele	$\tau = \tau_0 + b \sin h^{-1}\left(\frac{\dot{\gamma}}{c}\right)$	[Berg, 79] [Tattersall, 76 ^(a)]
Sisko	$\tau = a\dot{\gamma} + b\dot{\gamma}^c$	[Adjoudj15]
Robertson-Stiff	$\tau = A(\dot{\gamma} + B)^c$	[Atezeni, 85 ^(b)]
Atzeni et al	$\tau = \tau_0 + \mu_\infty\dot{\gamma} + b \sin h^{-1}\left(\frac{\dot{\gamma}}{c}\right)$	[Swalhi 14]
Eyring	$\tau = a \sin h (b\dot{\gamma})$	[Adjoudj 15]

Avec :

τ : contrainte de cisaillement [Pa]

μ : viscosité plastique [Pa.s]

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

II.3. Fluide thixotrope :

Les fluides à seuil s'écoulent seulement qu'après avoir dépassé le seuil de cisaillement. Si l'effort nécessaire pour maintenir un écoulement constant diminue en fonction du temps (ou si l'écoulement s'accélère en fonction du temps à effort constant), ce matériau est dit thixotrope [Chong Hu, 1990].

La Figure 1.2 représente l'évolution du couple au cours d'un essai rhéométrique. Pour un fluide idéal le couple est proportionnel à la vitesse de rotation. Pour un béton un effet de thixotropie est observé suite à un changement de la vitesse de rotation. Cet effet est représenté schématiquement sur la Figure 1.2. La différence est due au comportement thixotropique du béton qui crée un retard dans la réponse du matériau [Roussel, 2006].

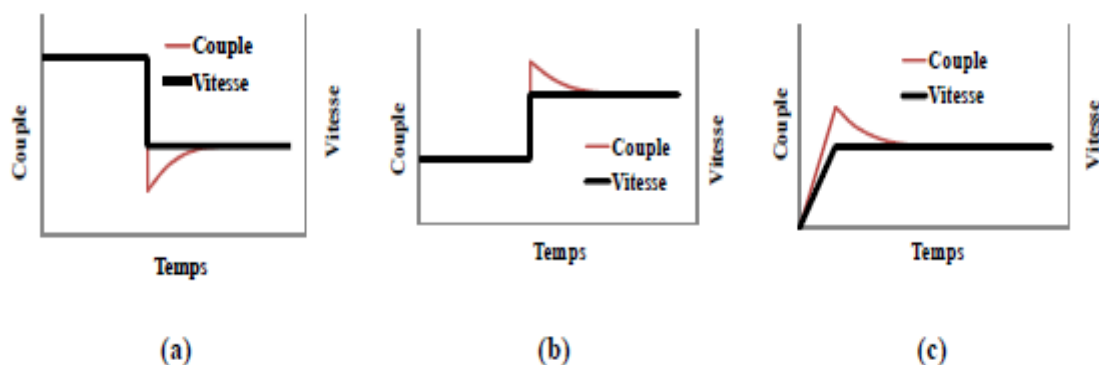


Figure 1.2. Exemples des courbes d'écoulement.

(a) diminution de la vitesse de rotation ; (b) augmentation de la vitesse de rotation ;

(c) augmentation de la vitesse de rotation après une période de repos [Roussel, 2006]

III. Les paramètres rhéologiques :

III.1. Concentration volumique solide ϕ :

Le paramètre Φ est sans dimension, généralement exprimé en pourcentage (%). Il représente le rapport du volume occupé par la phase solide au volume total du mélange.

La concentration volumique solide Φ est l'une des principales caractéristiques physiques d'une suspension.

$$\Phi = \frac{V_S}{V_S + V_V} \quad (1.2)$$

Où :

V_S : Volume solide.

V_V : Volume des vides.

Dans le cas d'une pâte de ciment aux additions fines minérales, on relie la concentration volumique ϕ au rapport E/C (eau/ciment) ou E/L (eau/liant), où L représente le liant formé par le ciment et les additions minérales par les relations suivantes [Cyr, 1999] :

- En fonction de E/C :

$$\phi = \frac{X}{X + E/C} \quad (1.3)$$

Avec :

$$X = \left(\frac{1}{\rho_c} + \frac{P}{(1-P)\rho_a} \right) \quad (1.4)$$

- En fonction de E/L :

$$\phi = \frac{Y}{Y + E/L} \quad (1.5)$$

Avec :

$$Y = \left(\frac{1-P}{\rho_c} + \frac{P}{\rho_a} \right) \quad (1.6)$$

Où

ρ_c : La densité du ciment.

ρ_a : La densité de l'addition.

P : le taux de substitution massique du ciment par un autre composant.

III.2. Indice des vides, Porosité :

L'indice des vides, noté (ϵ) est le rapport du volume des vides (V_V) au volume des grains solides (V_S).

La porosité (appelée également pourcentage des vides), notée n, correspond au rapport du volume des vides au volume total (V) de l'échantillon. Ces deux paramètres sont reliés par les relations :

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1.7)$$

$$e = \frac{1-\phi}{\phi} \quad (1.8)$$

$$w = \frac{1-\phi}{\phi} \times \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \quad (1.9)$$

$$n = 1 - \phi \quad (1.10)$$

Où :

$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ est le poids volumique de l'eau.

γ_s : Le poids volumique de la fraction solide.

III.3. 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 1.3).

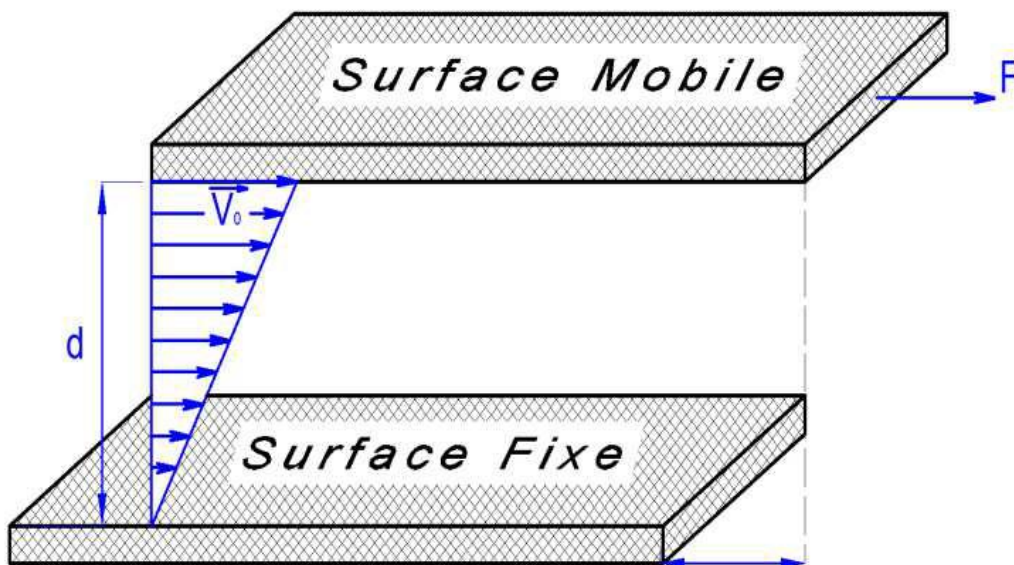


Figure.1.3. Schéma de la vitesse de cisaillement.

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse. Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Il se crée un *gradient de vitesse* entre les deux plans.

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

$$\gamma = dx/dz \quad (1.11)$$

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.

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz} \quad (1.12)$$

III.4. Contrainte de cisaillement τ [Pa] :

La contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide :

$$\tau = dF/dS \quad (1.13)$$

Où :

dS : Surface élémentaire d'une couche cisailée.

dF : Projection de la force de frottement tangentielle.

III.5. Seuil de cisaillement :

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous de cette valeur, ce dernier se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes) [Evans, 1992]. Il existe différentes méthodes pour mesurer le seuil de cisaillement, qui mènent parfois à des notions physiquement différentes.

III.5.1. Le seuil de cisaillement statique :

Le seuil statique correspond à la contrainte à fournir afin d'obtenir le premier signe d'écoulement. En effet, la méthode de mesure est appliquée à une suspension vierge de toute

sollicitation (à part le malaxage dans le cas de mélange), donc une suspension initialement structurée. Le seuil de cisaillement statique peut être déterminé en imposant une contrainte croissante jusqu'à la valeur provoquant l'écoulement de la suspension.

III.5.2. Le seuil de cisaillement dynamique :

Le seuil de cisaillement dynamique (τ_0) correspond à une valeur théorique qui découle de l'extrapolation de la courbe d'écoulement à un gradient de vitesse de cisaillement nul. Il s'agit alors d'une valeur obtenue après la déstructuration du corps. La méthode de mesure consiste à déstructurer complètement la suspension testée en appliquant un gradient de vitesse suffisamment élevé, d'établir ensuite la courbe d'écoulement en faisant varier le gradient de vitesse et de déduire la valeur de la contrainte à une valeur nulle du gradient de vitesse, à partir de l'équation du modèle.

Par conséquent, la valeur du seuil de cisaillement statique est logiquement supérieure à celle du seuil de cisaillement dynamique, en raison de l'état de déstructuration de la matière cisillée.

III.6. La viscosité :

III.6.1. La viscosité dynamique :

Au repos, un liquide peut être considéré comme un ensemble de couches moléculaires parallèles et soumis à une contrainte tangentielle, une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente. En raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement. Ainsi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse (Figure 1.4). Cet effet de retard, provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé la viscosité. La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. Le coefficient de viscosité est une grandeur physique qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Sa connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologie du matériau. Ce paramètre est défini par la relation suivant :

$$\mu = \tau / \dot{\gamma} \quad (1.12)$$

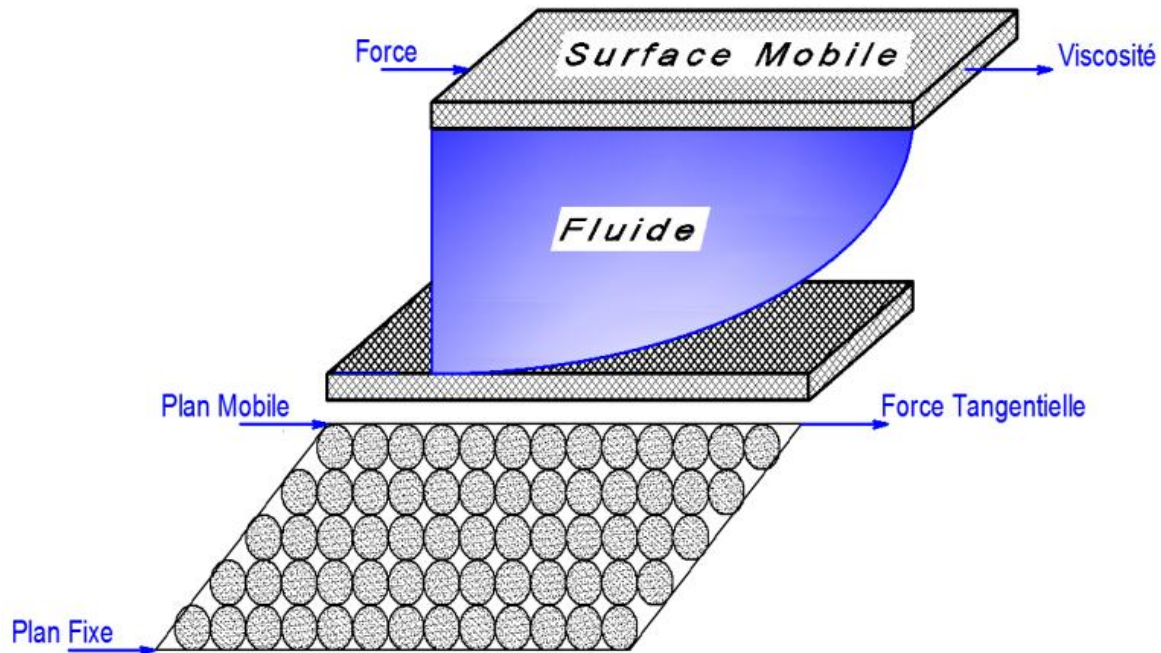


Figure.1.4. Schéma du glissement des couches.

III.6.2. La viscosité cinématique :

C'est le rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique du fluide, ρ étant la densité du fluide, ν la viscosité cinématique. On définit la viscosité cinématique ν d'un fluide à partir de sa viscosité dynamique μ par la relation :

$$\nu = \mu / \rho \quad (1.13)$$

VI. LE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE :

De nombreux auteurs ont montré que le comportement rhéologique du béton à l'état frais est bien représenté par celui des fluides de Bingham [Tattersall, 1990], [Banfill P.F.G, 1990], [Beaupre, 1994], [Ferraris, 1998], [De Larrard, 2002], [LCPC, 2002], [Golaszewski, 2003], [Wallevik, 2006], [Adjoudj, 2015], [Soualhi, 2014], [Estellé, 2008], [Koehler, 2008], [Lanos, 2009], [Wen-Chen, 2010], [Burgos-Montes, 2012], [Choi, 2014].

Dans ce cas, le comportement du béton à l'état frais est complètement décrit via deux propriétés: **le seuil de cisaillement (τ_0)** et **la viscosité plastique (μ)**. En effet, pour mettre le béton à l'état frais en mouvement, un effort minimal équivalent au seuil de cisaillement doit être fourni. Une fois le mouvement amorcé, la force requise pour déformer le béton est

directement proportionnelle au taux de cisaillement appliqué, ce taux étant relié à la viscosité plastique du matériau [Hu, 1995].

La loi de comportement de Bingham s'écrit sous la forme suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.14)$$

Où :

τ : La contrainte de cisaillement [Pa]

μ : la viscosité plastique [Pa. S]

τ_0 : le seuil de cisaillement [Pa]

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

Le terme τ_0 apparaît comme la contribution de la phase solide et le terme $\mu \dot{\gamma}$ comme celle de la phase liquide (Figure 1.5).

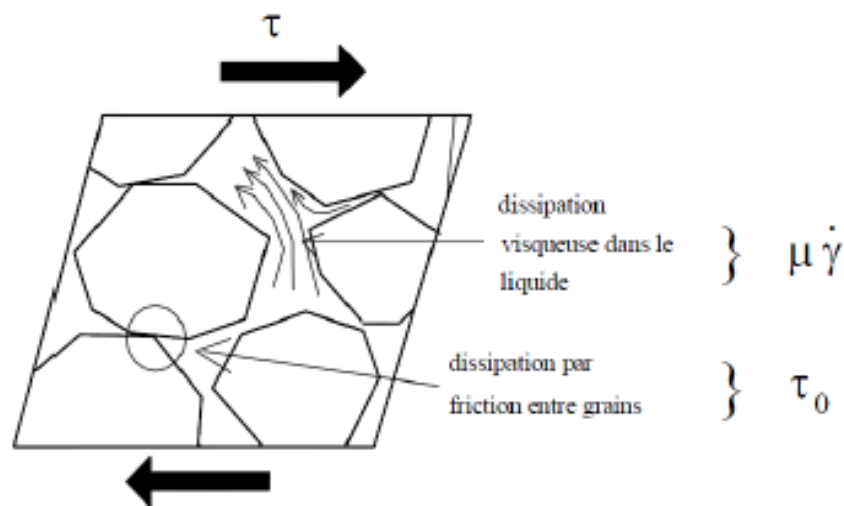


Figure 1.5. Contribution de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [De Larrard, 2000].

La représentation graphique du comportement rhéologique de deux bétons est illustrée dans la figure 1.6. La maîtrise des paramètres rhéologiques permet de savoir comment optimiser la mise en place .

Figure 1.6. Représentation graphique du modèle de Bingham

Références bibliographiques

- Adjoudj, M. « Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton ». Thèse de doctorat, soutenue en 2015, France, Algérie, 161p.
- Amziane, S. « Contribution à l'étude des matériaux cimentaires à l'état frais ». Pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches en Sciences 2005 » Université de Bretagne sud, 2005.
- Atzeni, C. et al. « Comparison between rheological models for portland cement paste ». Cement and Concrete Research, (1985) vol. 15, p. 511-519 .P.F.G. Banfill 2003.
- Atzeni, C. Massida, and Sanna, U. « New Rheological Model for Portland Cement Pastes ». Il Cemento 80 (1983).
- Beaupré, D. « Rheology of High Performance Shotcrete ». PhD thesis, University of British Columbia, Canada, 1994.
- Berg, W.V. « Influence of specific surface and concentration of solids upon the flow behavior of cement pastes ». Cement and Concrete Research. 31, 211-216 (1979).
- Choi, M. « Numerical Prediction on the Effects of the Coarse Aggregate Size to the Pipe Flow of Pumped Concrete ». Journal of Advanced Concrete and Technology, vol. 12(8), pp. 239-249, 2014.
- Coussot, P. Coussot and Grossiardi, J. « Comprendre la rhéologie, de la circulation du sang à la prise du béton ». EDP Science, 2002.
- De Larrard F. and Sedran, T. « Mixture-proportionning of high-performance concrete ». Cement and Concrete Research. vol. 31(11), pp. 1699-1704, 2002. LCPC, « Pompage des bétons » Guide technique, Mars, 2002.
- De Larrard, F. « Structures granulaires et formulation des bétons ». Laboratoire central des ponts et chaussées, 2000.
- Edwige, N. « Compatibilité setin compatibilités liants cimentaires /superplastifiants ». Luxembourg, mémoire, soutenue en 2010, 208p.
- Estellé, P. Lanos C. et Duc, T. P. « Caractérisation de l'écoulement du béton frais ». In 43^{ème} colloque du Groupe Français de Rhéologie, 2008.

- Ferraris C. Ferraris and De Larrard F. «Testing and Modelling of Fresh Concrete Rheology». NISTIR 6094, National Institute of Standards and Technology, p. 59 pages, 1998.
- Golaszewski, J. and Szwabowski, J. «Influence of superplasticizer on rheological behaviour of fresh cement mortars». Cement and Concrete Research. Vol. 34(2), pp. 235-248, 2003.
- Hu, C. De Larrard, F. Sedran, T. Boulay, C. Bose F. and Deflorenne, F. «Validation of BTRheom the new rheometer for soft-to-fluid concrete». Materials and Structures, vol. 29, pp. 620-631, 1996.
- HU, C. « Rhéologie des bétons fluides ». Etudes et Recherches des Laboratoires des ponts et Chaussées, OA 16, 203 p., Paris, France, 1995.
- Koehler, E. Fowler, D. Ferraris C. and Amziane, S. «New portable rheometer for fresh self-consolidating concrete». ACI Materials Journal, vol. 233, pp. 97-116, 2006.
- Lanos, C. Estellé, P. « Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais ». European Journal of Environmental and Civil Engineering, 13(4), pp. 457-471, 2009.
- Nehdi, M. Rahmam, M-A. « Estimating rheological properties of cement paste using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction ». Cement and Concrete Research, 34 (2004), pp. 1993-2007, 2004.
- Roussel, N. «A theoretical frame to study stability of fresh concrete». Materials and Structures, vol. 39, pp. 81-91, 2006.
- Sheinn, A.M.M. Ho, D.W.S. Tam, C.T. «Rheological model for self-compacting concrete-paste rheology». Proceedings of the 27th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapour, CI Premier Singapour, pp, 517-523, 28-29 August 2002.
- Soualhi, H. « Optimisation de la viscosité des bétons à faible impact environnemental ». Thèse de doctorat, soutenue en 2014, France, 166p.
- Tattersall, G. «Application of rheological measurements to practical control of concrete». Liverpool, 1990.
- Tattersall, G. H. «The workability of concrete». A viewpoint Publication. PCA, 1976.
- Wallevik, J. «Relationship between the Bingham parameters and slump». Cement and Concrete Research, vol. 36(7), pp. 1214-1221, 2006.

Chapitre II



Paramètres influents sur la rhéologie des matériaux granulaires

Résumé

Ce chapitre présente une étude détaillée sur l'influence de certains constituants sur les paramètres rhéologiques des mélanges à l'état frais.

Dans un premier temps, on va se baser sur les additions organiques et précisément sur les superplastifiants ensuite, nous allons montrer l'influence des additions minérales (filler, pouzzolane, marbre) Aussi, nous mettrons en valeur l'influence du rapport E/C, la nature du ciment et nous terminerons ce chapitre par l'influence des phénomènes perturbateurs.

Sommaire du chapitre 2

I.	Introduction.....	15
II.	Paramètres modifiants la rhéologie.....	15
III.	Phénomènes perturbateurs.....	43
	Référence bibliographiques.	44

I. Introduction :

Afin d'améliorer les performances des matériaux granulaires à l'état frais et durci, les chercheurs ont pensé à l'incorporation conjuguée d'additions minérales et organiques. Cela conduit de manière significative à réduire la quantité d'eau nécessaire et améliorer la compacité des mélanges.

L'utilisation de ces additions permet d'améliorer sa maniabilité, augmenter sa résistance et croître la durabilité du béton. [Adjoudj, 2015].

II. Paramètres modifiant la rhéologie :

Plusieurs paramètres influent sur les paramètres rhéologiques des matériaux granulaires [Tattersall et col., 1991].

II.1 Influence des additions organiques :

Les additions organiques sont des molécules polaires qui une fois ajoutées à un mélange granulaire ont pour rôle de modifier certaines caractéristiques spécialement à l'état frais. Dans notre étude, nous nous intéressons uniquement aux superplastifiants.

Les superplastifiants sont souvent utilisés afin d'obtenir une maniabilité satisfaisante. Ils permettent d'éviter l'agglomération des particules de ciment et de libérer l'eau emprisonnée par ces grains, de plus, ils permettent d'accélérer ou retarder le temps de prise selon les exigences du chantier, de ce fait, les adjuvants peuvent être considérés comme des constituants du béton au même titre que les éléments de base.

II. 1 .1 Type de superplastifiant :

Il existe sur le marché plusieurs types de superplastifiants :

II.1.1.1 les lignosulfonates modifiés (LSM) :

Apparus en 1932, ils se présentent comme les premiers adjuvants organiques. Ce sont des poly électrolytes qui dispersent la suspension par effet purement électrostatique (Figure (2.1)). Ce type d'adjuvant (lignosulfate) a été abandonné à cause de l'entraînement d'air dans le béton, qui provoque une augmentation de la porosité.

Les bulles d'air ont l'avantage de diminuer le phénomène de ségrégation aidant aussi à assurer une bonne ouvrabilité aux mélanges et à améliorer la résistance gel dégel.

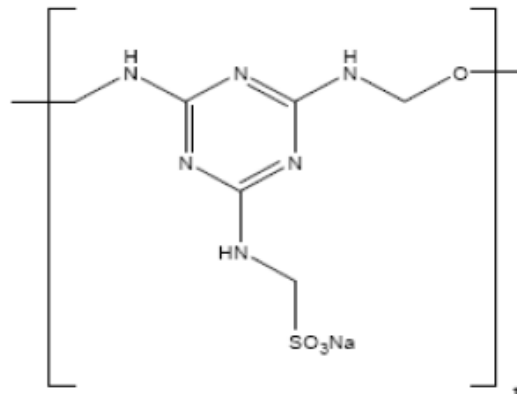


Figure 2.1 : Structure chimique des Lignosulfonates modifiés LSM.

II.1.1.2 les poly naphthalènes sulfonâtes (PNS) et poly mélanines sulfonâtes (PMS) :

Pendant plus de 30 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 de ces nouveaux produits développés en 1960 sont les sels sulfoniques de condensés de formaldéhyde et de naphthalène (produit Japonais) PNS ou de mélanine (produit Allemand) PMS. Ils ont été commercialisés sous divers noms : superplastifiant, super réducteurs d'eau, fluidifiant. Ce sont aussi des poly électrolytes qui dispersent la suspension par effet purement électrostatique.

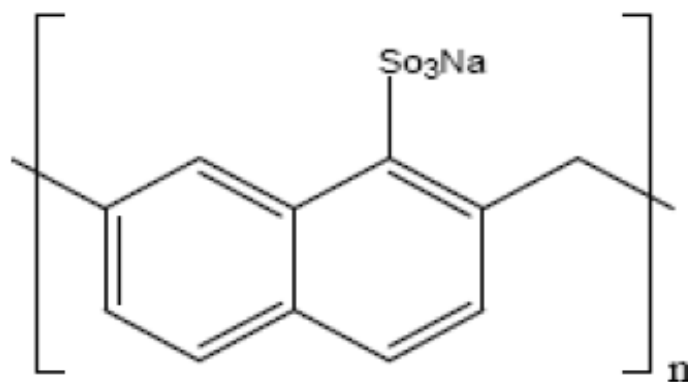


Figure 2.2 : Structure chimique des polynaphthalènes sulfonâtes PNS.

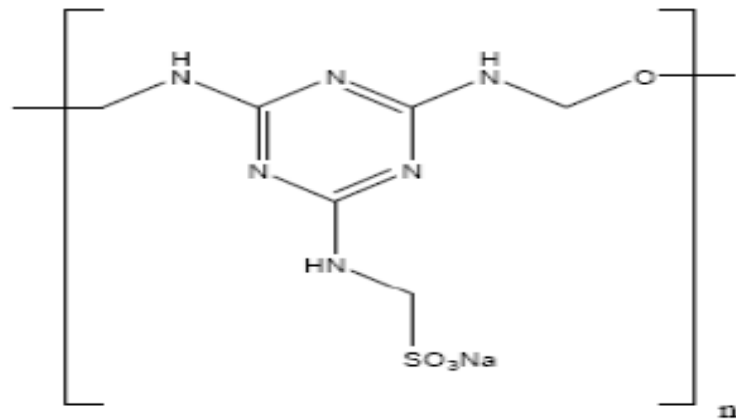
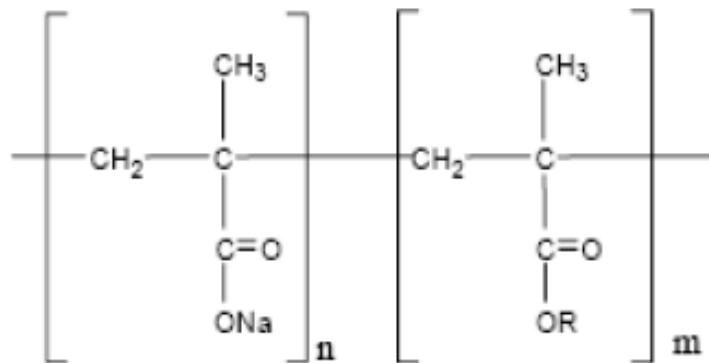


Figure 2.3 : Structure chimique des poly mélaninessulfonâtes PMS.

II.1.1.3. Les poly carboxylates :

En 1980, l'apparition des poly carboxylates nommés PC est une grande évolution des super réducteurs d'eau, ils sont formés d'une combinaison de polymères dont le mécanisme de dispersion fait par une répulsion combinée électrostatique et stérique.

Le regroupement fonctionnel est formé d'acides méthacryliques ou acrylique, avec un groupe actif anionique (plus efficace par rapport au sulfonâtes) et qui a été partiellement starifié avec plusieurs chaines latérales de poly oxyde d'éthylène (notée PEO).



R=oxyde d'éthylène par exemple

Figure 2.4 : Structure chimique des polycarboxylates PC [Hasni, 1999]

II.1.1.4. Les sulfonâtes ethoxyles :

En 1990 apparurent les sulfonâtes ethoxyles, appelés phosphorâtes ethoxyles et formés par une unique chaîne d'oxyde d'éthylène avec un groupe fonctionnel PO_3^- .

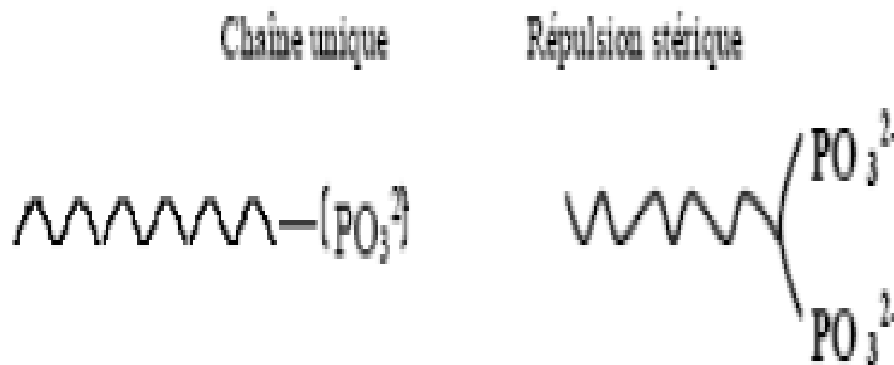


Figure 2.5 : Les phosphorâtes ethoxyles

II.1.2. Mode d'action des superplastifiants :

II.1.2.1. Adsorption :

Les molécules du superplastifiant se fixent par adsorption sur l'interface entre les grains de ciment et l'eau de gâchage. Une fois adsorbé le superplastifiant forme une charge négative autour de chaque grain de ciment qui se repoussent les uns des autres. La dispersion qui en résulte est une diminution de la viscosité plastique de la pâte de ciment et une augmentation de l'ouvrabilité [Ramadachandran et col., 1998].

L'adsorption des superplastifiants à la surface des particules de ciment est liée à un potentiel de surface important.

II.1.2.2. Défloculation par répulsion électrostatique :

La répulsion électrostatique est fréquente dans le cas des molécules de superplastifiant à structure linéaire. En plus, une densité de charge importante du polymère permet une adsorption forte et une bonne répulsion électrostatique.

II.1.2.3. Dispersion par effet stérique :

La répulsion stérique est aussi fréquente quand les molécules de superplastifiant sont utilisées.

Selon les résultats de [Neubauer et col., 1998] la dispersion des grains de ciments observé est principalement due aux répulsions stériques.

Uchikawa et col. (1992) ont conclu que les forces électrostatiques jouent un rôle important dans le mécanisme de dispersion pour des superplastifiants de types PNS et PMS, tandis que les forces stériques sont critiques pour un superplastifiant de type PC.

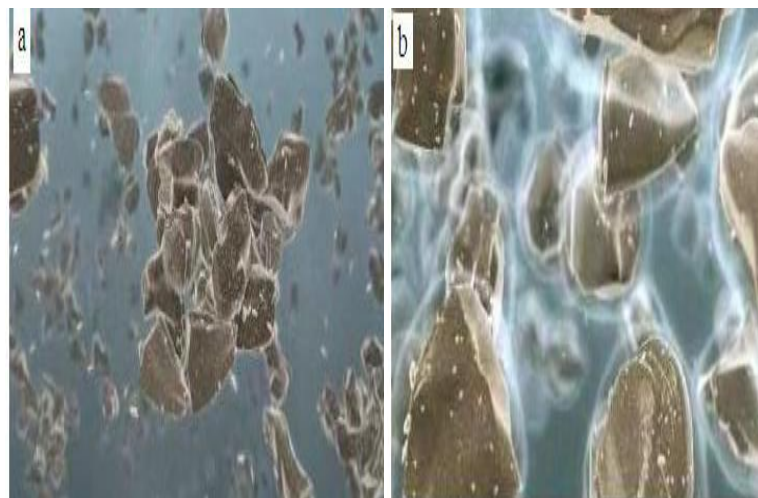


Figure 2.6 : Schéma de la structure d'une pâte de ciment
a) floculée (sans superplastifiant) ; b) dispersée (avec superplastifiant).

II.1.3. Effet des superplastifiants sur la rhéologie :

II.1.3.1. Effet du mode d'introduction :

[Chichio et col., 1985] ont montré que le meilleur moment d'ajouter un superplastifiant est au-delà de la période d'induction.

La figure 2.7 montre des résultats d'essais d'affaissement où l'introduction de superplastifiant a été divisée en deux parties une moitié lors du contact avec l'eau de gâchage et l'autre moitié quelques minutes après le malaxage.

Les résultats obtenus montrent que la fluidité initiale a été augmentée, et que la perte de fluidité a été beaucoup réduite lorsque la deuxième moitié du superplastifiant a été ajoutée trois minutes après le début du malaxage.

La réduction du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique dépend donc de la composition du ciment et du temps d'introduction du superplastifiant dont le temps optimal étaient de 10 à 15 minutes après le début du malaxage [Kim, 2000].

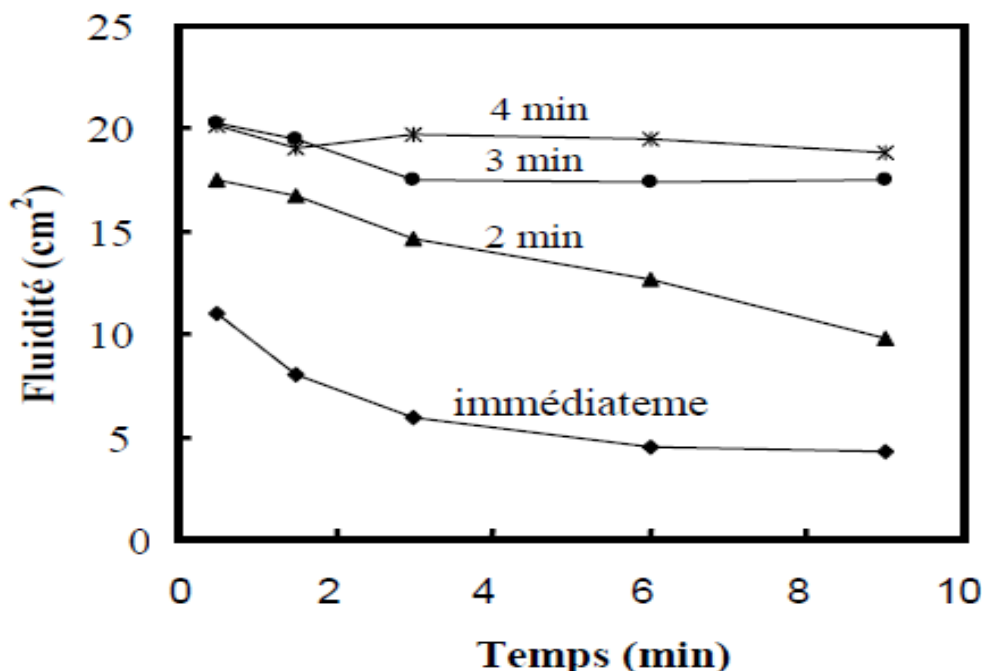


Figure 2.7 : Effet du temps d'introduction du superplastifiant sur les paramètres rhéologiques.

II.1.3.2. Effet de la nature du superplastifiant :

Des résultats ont confirmé que le superplastifiant de type PNS est plus performant que le PMS [Lessard, 1990]. Une autre étude comparative a montré que les pâtes de ciment contenant du PNS sont plus fluides que celles contenant du LS en raison de la forte affinité du PNS aux grains de ciment [Uchikawa et col., 1992].

Dans une étude menée par [Golaszewski et Szwabowski, 2004] il a été trouvé que le superplastifiant à base de poly carboxylate était plus efficace que le superplastifiant à base de naphthalène sur l'amélioration des propriétés rhéologiques des mortiers.

D'autres travaux ont confirmé que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique diminuent lorsqu'un superplastifiant de type PNS est employé [Parck et col., 2005].

La figure 2.8 illustre les résultats trouvés pour deux superplastifiants lorsqu'ils sont introduits, à différents dosages, dans la composition d'un mortier sans addition minéral. Le superplastifiant à base de polycarboxyates, est plus efficace et apporte un grand gain d'ouvrabilité lorsqu'il est dosé au-delà de 0.2%. Tandis que pour le superplastifiant LS, à base

de Lignosulfonates, il n'est que de 10 cm. De même, la variation de la viscosité du mortier est plus influencée par le dosage de 0.2% où elle atteint une chute considérable pour les deux superplastifiants. Pour un mortier témoin ayant une viscosité de 4 Pa.s, on a enregistré une chute de 64 et 41% en utilisant 0.2% respectivement de PC et de LS. Cette chute n'est que de 40 et 25% lorsqu'on ajoute encore 0.2% de ces adjuvants. Au-delà de ce dosage, les valeurs de l'affaissement et de la viscosité plastique se stabilisent, montrant un comportement de saturation où tous excès de dosage n'apporte qu'une amélioration marginale.

L'effet des superplastifiants, sur le seuil de cisaillement, reste considérable et sa variation suit une chute linéaire avec le dosage en superplastifiant où l'effet de saturation ne semble pas évident pour des dosages proche de 0.4%. La diminution du seuil de cisaillement, pour les premiers 0.2% des superplastifiants est de 50 et 26% respectivement pour le PC et le LS. Cette diminution semble monotone alors que pour les deux autres 0.2%, elle reste autour de 60 et 20% [Adjoudj, 2013].

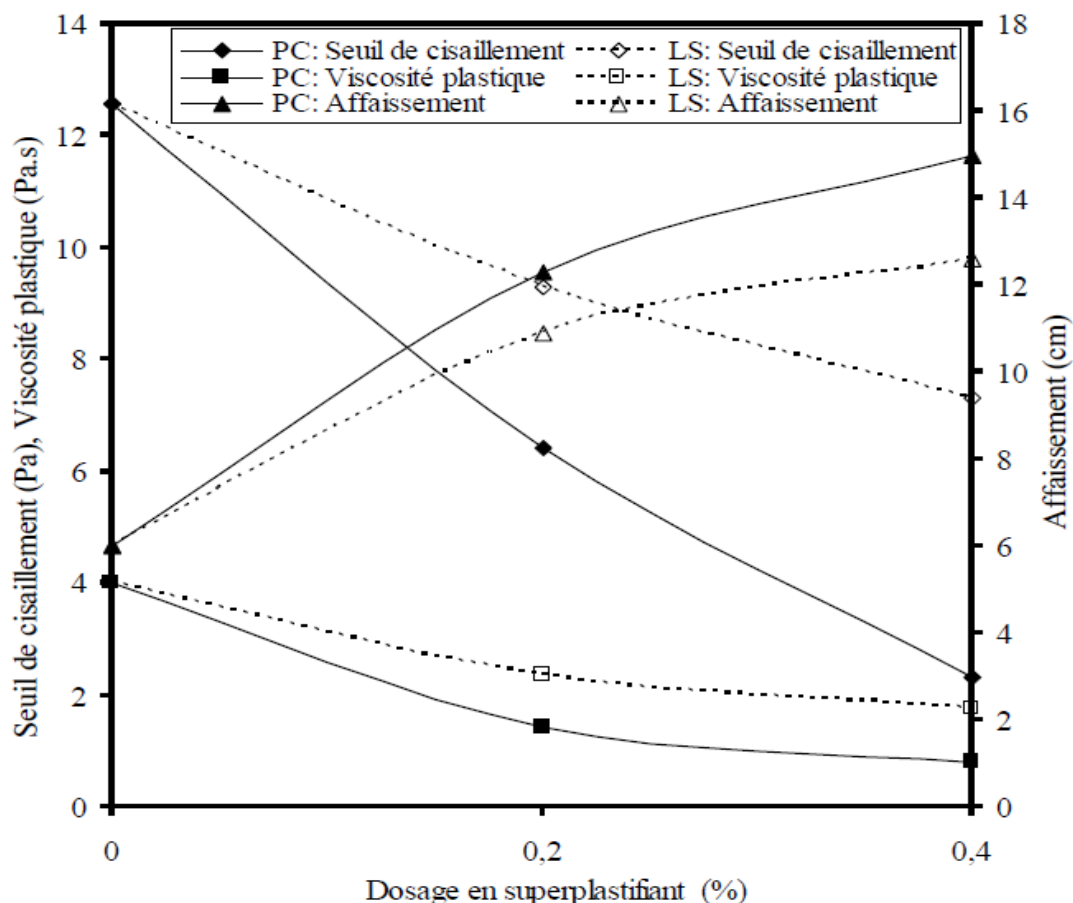


Figure 2.8 : Effet du superplastifiant sur les propriétés rhéologiques du mortier sans additions minérales.

II.1.3.3. Effet du dosage en superplastifiant :

Plusieurs chercheurs [Golaszewski et Szwabowski, 2004], [Yen et col., 1985], [Adjoudj et col., 2013] envisagent que plus le dosage en superplastifiant et le rapport E/C est élevé plus le comportement rhéologique se maintient dans le temps.

[Aitcin, 1990] a montré que lorsqu'on utilise un superplastifiant à très forts dosages cet effet enveloppant peut retarder l'hydratation des grains de ciment quelque soit la nature du superplastifiant, du type de ciment ou la dimension moyenne de ses grains, la présence de superplastifiant permet en effet de compenser la consommation du polymère par les grains de ciment et ses hydrates [Flatt et Houst, 2001].

[Sugamata et col., 1999] ont montré que l'augmentation du dosage d'un superplastifiant n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'un certain seuil. De même, [Shindoh et Matsuoka, 2003] ont aussi montré que l'ajout d'un superplastifiant aide à diminuer la viscosité à partir d'un certain dosage. Cette caractéristique est maintenant bien connue, il s'agit du dosage de saturation, c'est-à-dire le dosage au-delà duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la rhéologie du mélange.

[Hu, 1995] a fait une étude sur le dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques dans laquelle il a affirmé que le superplastifiant diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique par contre son effet sur la viscosité reste modeste après un certain dosage.

II.1.3.4. Effet des réducteurs d'eau :

L'ajout de réducteur d'eau produit une augmentation significative du seuil de cisaillement et une légère diminution de la viscosité plastique [Wallevik, 2011].

II.1.3.5. Effet des agents entraîneurs d'air :

La viscosité plastique diminue en augmentant la teneur en air mais le seuil de cisaillement reste inchangé. Donc la teneur en air affecte directement la viscosité plastique [Wallevik, 1983], [Wallevik, 2011].

II.1.3.6. Effet des agents de viscosité :

Les agents de viscosité sont généralement des dérivés cellulotiques des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ils ont pour but de diminuer le ressuage et d'empêcher le

risque de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en concevant une répartition homogène des différents constituants [Bouras, 2011].

II.2. Influence des additions minérales :

Les additions minérales sont des poudres d'origines minérales ou artificielles obtenus par broyage fin des particules à une finesse compatible à celle du ciment (inférieure à 80µm) telles que les fillers ou par récupération des déchets de centrales techniques telles que les cendres volantes ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, silice.....) ou encore issus de la production d'acier telles que les laitiers des hauts fourneaux. Ces additions sont utilisées dans la confection du béton en substitution partielle du ciment ou en complément afin d'améliorer certaines propriétés du béton afin de lui conférer des propriétés particulières (Younsi, 2012).

Elles sont définies par la norme Européenne EN 206-1 (2004) comme « matériaux finement divisés qui peuvent être ajoutés au béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ».

II .2.1. Type d'additions minérales :

Les ajouts minéraux se substituent au ciment et peuvent être classés en fines inertes de type I telles que le calcaire et en fines actives de type II qui sont des minéraux pouzzolaniques ou « latentes-hydrauliques ».

- Additions de type I selon la norme EN 206-1
 - Les additions calcaires (NF P 18-308),
 - Les additions siliceuses (NF P 18-509),
 - Les fillers (NF P 18-501),
 - La poudre de marbre.
- Additions de type II selon la norme EN 206-1 :
 - La fumée de silice (NF P 78-502),
 - Les cendres volantes de houille (NF P 18-505),
 - Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506),
 - La pouzzolane naturelle (EN 197-1).

L'utilisation de ces additions est très intéressante du point de vue rhéologique, car d'une part, elles sont moins réactives à court terme que le ciment ce qui permet de réduire les

élevations de températures excessives liées à la chaleur d'hydratation qui cause de forts retraits endogènes (Yamine, 2007), d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et d'autre part, elles permettent de perfectionner la granulométrie totale des particules fines en combinant plusieurs matériaux cimentaires (Belaidi et Brixi, 2013).

Les additions minérales peuvent avoir une influence chimique et/ou physique selon leur nature (Neville, 2000). L'effet physique se manifeste par la diminution du dosage en eau effective et ceci par effet granulométrique ou les grains s'insèrent entre les particules du ciment, augmentant ainsi la maniabilité et diminuant par la même occasion la perméabilité et la capillarité, ce qui va se traduire par une réduction de la fissuration. Chimiquement, certaines additions minérales peuvent produire des hydrates supplémentaires à travers des réactions pouzzolaniques.

Les substances minérales utilisées comme ajouts cimentaires ou additifs engendrent des modifications significatives sur les propriétés à l'état frais et durci.

A l'état frais, elles modifient la structure et les frictions inters granulaires dans la phase liquide, influent sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation (Ye, 2007) mais également en modifiant les produits d'hydratation formés dans la phase de prise et de durcissement (Kakili, 2000), (Xiong, 2003), (Péra, 1999), (Husson, 1992). En plus, certaines additions peuvent réagir chimiquement et deviennent plus actifs dans les solutions alcalines du ciment et produisent de nouveaux hydrates.

A l'état durci, elles permettent d'améliorer les résistances mécaniques des mélanges cimentaires et d'avoir une meilleure durabilité par leur activité de surface et de distribution granulaire.

Sur le plan rhéologique, Zhang et Han (2000) ont trouvé que le seuil de cisaillement augmente en fonction de la quantité d'addition ultrafine. Par contre, l'évolution de la viscosité dépend de la nature et de la quantité d'addition. Si le taux de substitution du ciment par les additions (fumée de silice, fillers, cendres volantes) est aussi inférieur à 15% la viscosité diminue (Zhang et Han, 2000). Au-delà de ce taux l'effet s'inverse.

L'influence des additions dépend de la nature et de la finesse des particules (Turcry, 2004).

Billberg (2001) a constaté que la diminution de la taille des fillers a pour effet de réduire le seuil de cisaillement. Par contre, la viscosité a tendance à croître dans ce cas.

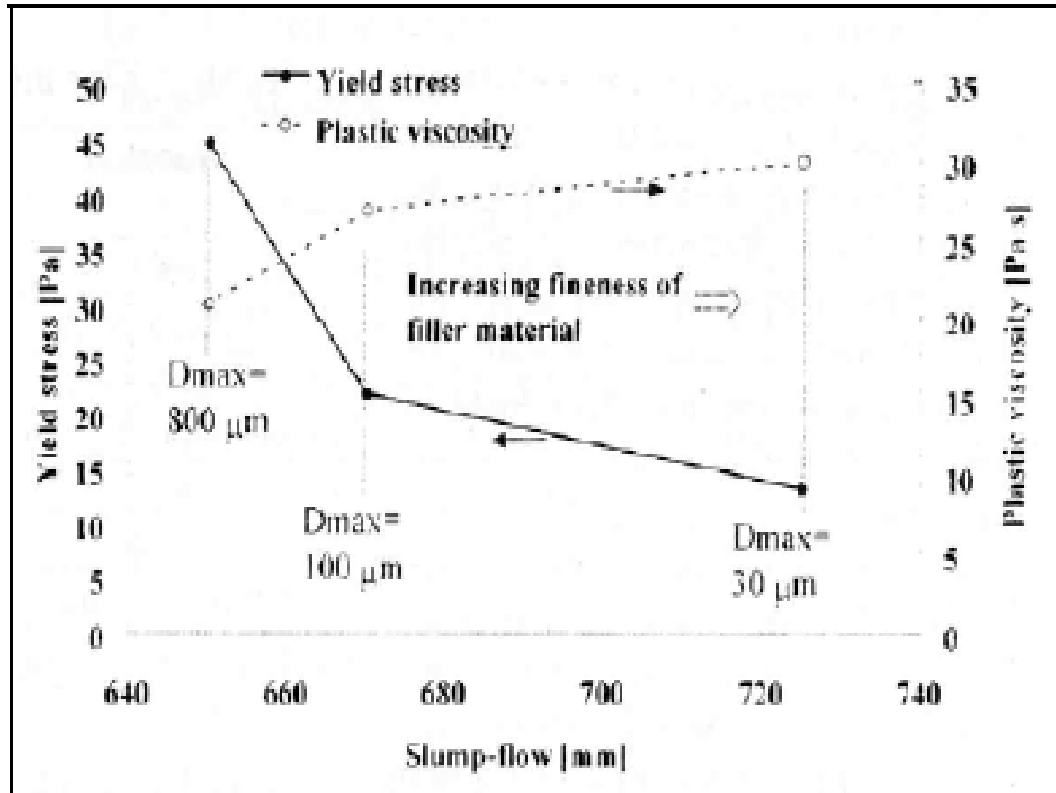


Figure 2.9 : Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [Billberg, 2001].

En étudiant la contribution des additions minérales sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers, Bessa (2004) a trouvé que l'effet granulaire des additions minérales sur les formulations des mortiers non adjuvés dépend en premier lieu de la finesse et de la quantité de l'addition introduite.

Il a constaté que la demande en eau devient plus importante lorsqu'on augmente la quantité des fines pour maintenir une ouvrabilité constante.

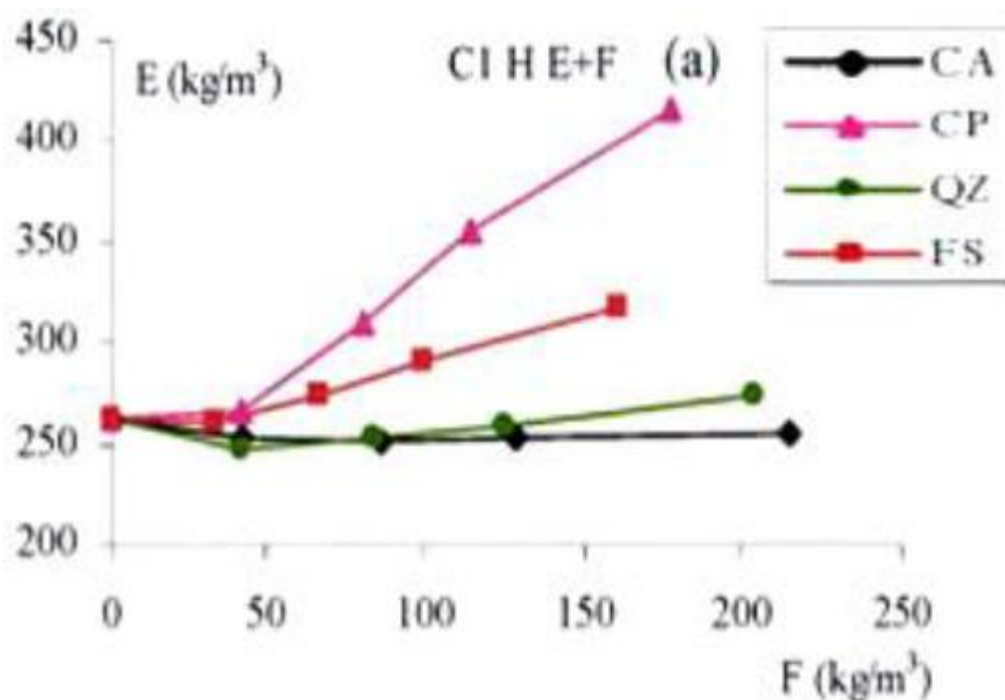


Figure 2.10 : Besoin en eau des mortiers CEM II – additions non adjuvantes en fonction du dosage en additions minérales (CA (Calcite), CP (Calcite Précipitée), QZ (Quartz), SF (Fumée de Silice)) (Bessa-Berdadine, 2004).

II.2.2. Effet des fillers calcaires :

Le calcaire est une roche sédimentaire, composé majoritairement de carbonate de calcium CaCO_3 . Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, des dolomites ou de calcites finement écrasées de manière à répondre aux critères de la conformité de la norme sur les additions calcaires NF P18-305.

Les fillers s'insèrent dans le squelette granulaire du ciment et permettent de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du mélange granulaire (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc influencer sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

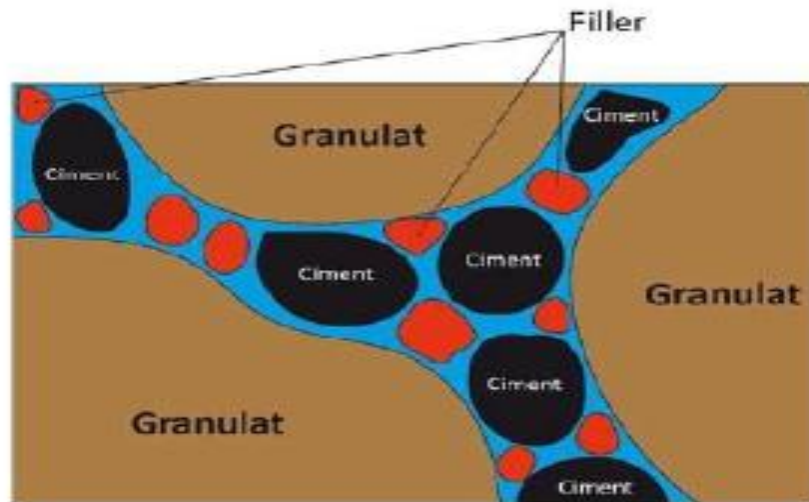


Figure 2.11: Illustration de l'effet filler

Ils interviennent dans la rhéologie des pâtes cimentaires par leurs granulométrie et leur réactivité chimique. Ils améliorent aussi les résistances mécaniques par la formation de la liaison avec la pâte du ciment.

Les fillers calcaires jouent un rôle très important dans la formulation des bétons et des mortiers. Ils sont essentiellement utilisés dans l'industrie comme additions inertes et permettent de remplacer une quantité du ciment et éventuellement d'augmenter le volume du liant dans les mélanges granulaires. Leur influence sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci est prise en compte pour limiter l'apparition des désordres (perte de maniabilité, baisse de résistance, homogénéité).

L'ajout des additions calcaires au ciment peut produire plusieurs modifications sur le squelette granulaire.

La faible finesse de ces particules permet de combler les vides et d'augmenter la densité. Par conséquent, l'eau piégée entre les pores granulaires est libérée ce qui augmente la compacité, améliore l'ouvrabilité et diminue la demande en eau (Bonavetti, 2000), (Menendez, 2001), (Yahia, 2005).

Esping (2008) a montré que le seuil et la viscosité augmentent en fonction de la surface spécifique du filler mesurée par la méthode technique BET pour un dosage en eau constant. Par contre, El Hillali (2009) a remarqué que la finesse des fillers calcaires influe de manière significative sur la quantité d'eau nécessaire pour remplir les vides dans la pâte de ciment. Il a trouvé aussi que la viscosité des BAP diminue légèrement avec l'augmentation de la finesse

des additions calcaires ce qui implique une réduction du seuil de cisaillement des pâtes de ciment.

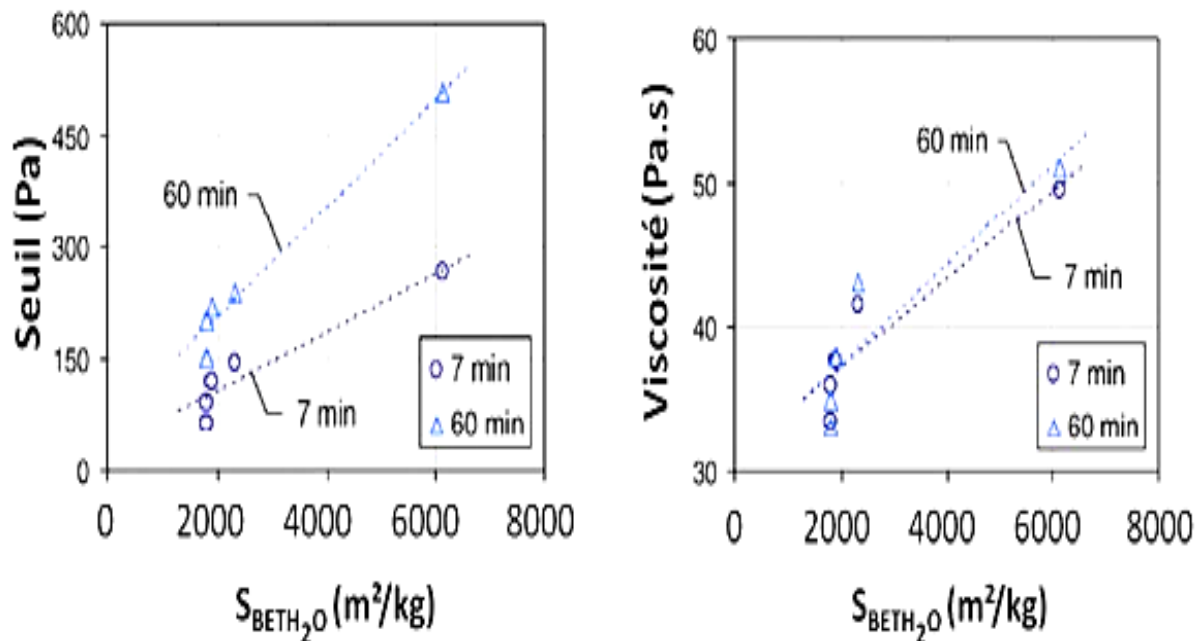


Figure 2.12: Évolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique de l'addition minérale (Esping, 2008)

Par ailleurs, la concentration volumique en solide, qui lorsqu'elle augmente entraîne une augmentation à la fois du seuil et des viscosités (Legrand, 1971).

Les fillers calcaires sont composés de particules de dimensions inférieures à 125 μ m, leur surface spécifique va jouer un rôle prépondérant sur l'écoulement en suspension (Legrand, 1971). En effet, travaillant à l'échelle de la suspension de filler, Michel et col. (2007) montrent une relation directe entre la demande en eau mesurée par l'intermédiaire du β_p (demande en eau déterminée à partir d'une combinaison de mesures d'étalement sur pâtes à teneur en eau variable [Filltech, 2007]) et la surface spécifique BET.

On peut ainsi observer une augmentation de la demande en eau avec une augmentation de la surface spécifique BET.

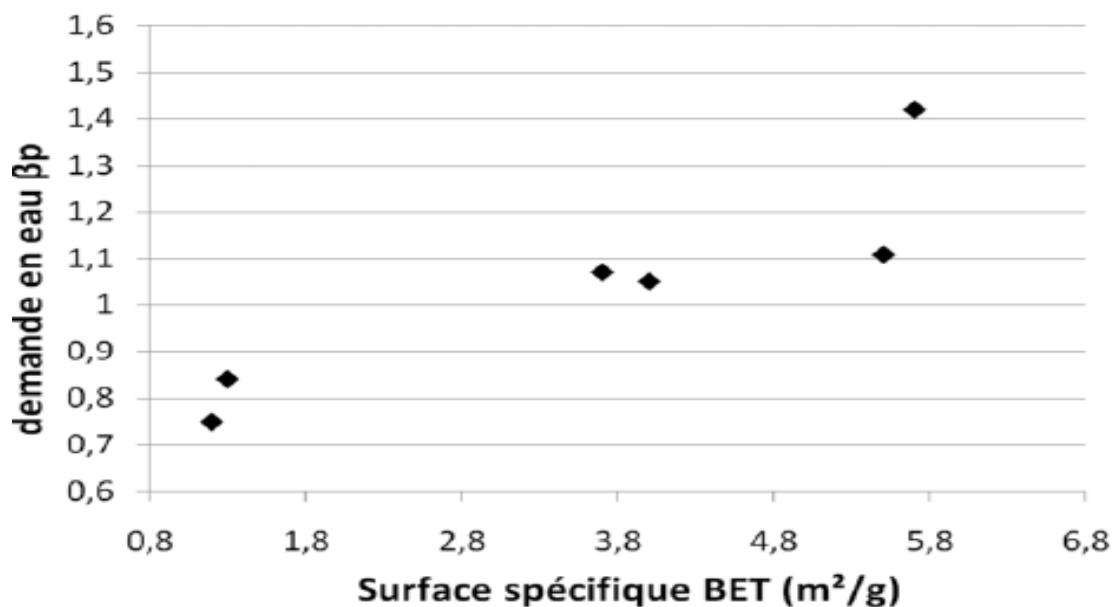


Figure 2.13 : relation entre la demande en eau d'un filler et sa surface spécifique BET (Michel et col., 2007).

Cette demande en eau plus importante induite par une surface spécifique plus importante du filler calcaire va alors influencer sur les propriétés d'écoulement des mélanges cimentaires.

En effet, plusieurs recherches montrent que l'augmentation de la surface spécifique du filler (mesurée par la technique BET ou Blaine) entraîne une altération des propriétés d'écoulement (à teneur en eau fixée) que ce soit à l'échelle de la pâte, du mortier (Michel, 2007), (Billberg, 1999) ou du béton (Nehdi, 1998), (Esping, 2008).

Par ailleurs, plusieurs auteurs ont remarqué que, pour un dosage constant en ciment (ou un rapport E/C constant), l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer la viscosité d'une pâte de ciment (malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides), avant de provoquer une augmentation de la viscosité lorsque son dosage dépasse une certaine valeur critique, qui dépend du rapport E/C (Yahia, 2005), (Zhang, 2000).

D'un autre côté Taleb (2009) a constaté que le besoin en eau est plus important lorsqu'il s'agit d'utiliser des fines calcaires en substitution d'une partie de ciment et d'après les résultats obtenus il a souligné que les fillers calcaires diminuent la viscosité du béton jusqu'à un certain taux de substitution, au-delà duquel les frictions entre les particules deviennent plus importantes et augmentent, par conséquent, la viscosité du mélange.

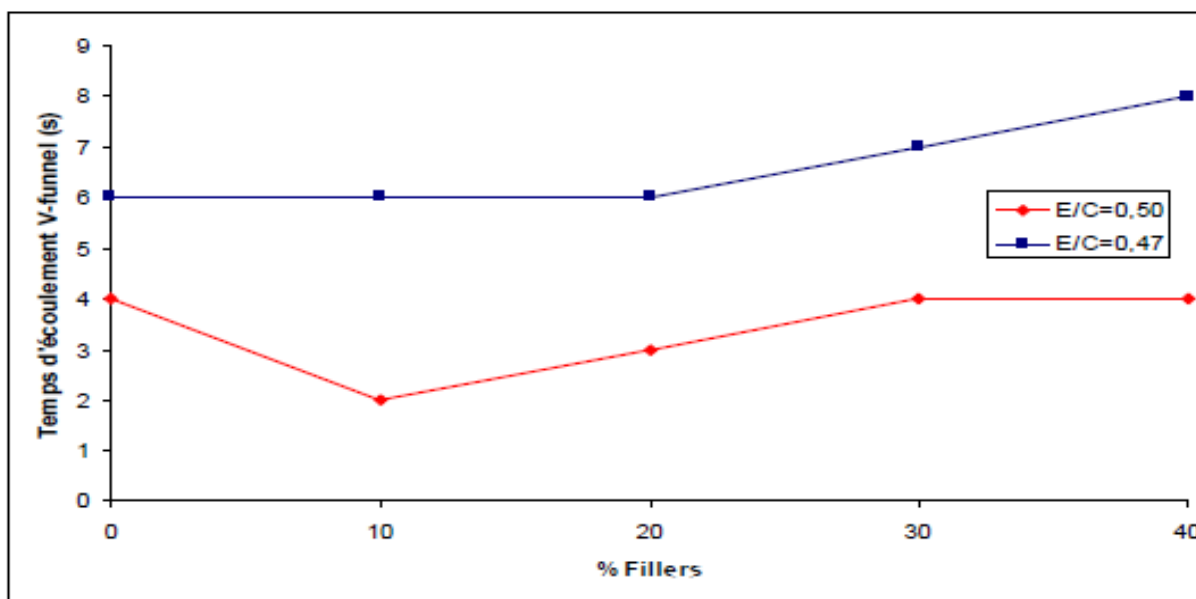


Figure 2.14 : Temps d'écoulement au V-funnel en fonction du pourcentage de fillers calcaires (Taleb, 2009).

Sur une autre étude relative à l'effet des additions ultrafines sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment, Zhang et Han (2000) ont constaté que le seuil de cisaillement augmente avec la quantité d'addition ultrafine incorporée, mais la viscosité de la pâte varie avec la nature et la quantité d'addition.

A. Ghezal (1999) a formulé deux bétons autoplaçants avec différents pourcentages en fumée de silice et de fillers calcaires substitués au ciment portland. L'auteur a constaté que les deux bétons présentent des paramètres rhéologiques acceptables mesurés avec le rhéomètre IBB et les valeurs de la capacité de remplissage mesurées avec l'essai du caisson sont très satisfaisantes (Cité par Bensebti, 2008).

Bouhamou et col. (2008) ont remarqué que le ressuage diminue quand le dosage en fines calcaires augmente parce que ces particules fines s'hydratent plus rapidement et surtout parce que leur taux de sédimentation est plus faible. Ils ont trouvé aussi que l'augmentation du dosage en fines calcaires engendre une diminution du taux de remplissage à cause de l'augmentation de la viscosité.

II.2.3. Effet de la pouzzolane :

La pouzzolane est une roche naturelle correspondant à des projections volcaniques, scoriacées, essentiellement stromboliennes et basiques, c'est-à-dire d'une composition basaltique, sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer, présent respectivement sous forme de magnétique ou d'hématite.

L'incorporation de la pouzzolane naturelle au ciment a des avantages sur les propriétés rhéologiques du béton à l'état frais.

L'utilisation croissante de la pouzzolane naturelle entraîne une diminution des diamètres d'étalement, cette diminution de l'étalement est due à la forte demande en eau et en superplastifiant de la pouzzolane utilisée. Ce résultat peut être traduit par la finesse élevée de cette addition minérale par rapport à la finesse du ciment, et aussi par la présence d'alumine (Al_2O_3) dans la pouzzolane naturelle. Ce composant chimique a une influence sur la consommation du superplastifiant qui pénalise l'étalement (Belifa, 2012).

Şahmaran (2008) et Hallal et col. (2009) ont trouvé que la viscosité augmente rapidement en fonction du taux de substitution de la pouzzolane naturelle, tel que le seuil de cisaillement est de 3 à 10 fois le seuil de la pâte de ciment sans pouzzolane. L'augmentation des paramètres rhéologiques du ciment pouzzolanique est due à un système de vides et de canaux présents dans la structure de leurs grains, qui conduisent à l'adsorption de l'eau libre du mélange. Ce phénomène est responsable de l'augmentation des propriétés rhéologiques des ciments constitués aux pouzzolanes.

II.2.4. La fumée de silice :

La fumée de silice est un coproduit industriel résultant du dépoussiérage des fumées issues des fours à arc électrique lors de la fabrication de silicium métallique et ses alliages de Ferro silicium produite par la réduction du quartz très pur par du charbon dans le four, puis elle est recueillie par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion.

La fumée de silice se combine avec l'oxygène de l'air pour donner de l'oxyde de silicium SiO_2 en quantité prédominante (>90%). Ces particules ultrafines permettent d'étendre la granulométrie de l'ensemble du squelette granulaire du ciment en comblant les vides et en augmentant la compacité. En plus, sa structure amorphe permet de consommer la chaux en créant des nouveaux hydrates par une réaction pouzzolanique.

L'influence de la fumée de silice sur le comportement rhéologique n'est pas claire pour certains auteurs.

Selon Park et col. (2005) et Ferraris et col. (2001) la fumée de silice augmente le seuil de cisaillement et la viscosité en augmentant la compacité des mélanges.

Tandis que, Carlswald et col. (2003) ont trouvé que la fumée de silice maintient la viscosité par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence.

Ferraris et col. (2001) ont montré que l'introduction de cet ajout dans les pâtes cimentaires, ou dans les mortiers augmente la demande en eau et en superplastifiant. Dans le même ordre d'idée, Nanthagopalan et col. (2008) ont remarqué que la fumée de silice influe sur l'écoulement du béton parce que la demande en eau est plus importante que le ciment, ce qui mène à réduire l'ouvrabilité et augmente la viscosité. Park et col. (2005) ont trouvé par des études sur les propriétés rhéologiques des pâtes cimentaires qui contiennent les additions de fumée de silice en utilisant un rhéomètre, que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique augmentent en fonction du taux de substitution du ciment par cet addition.

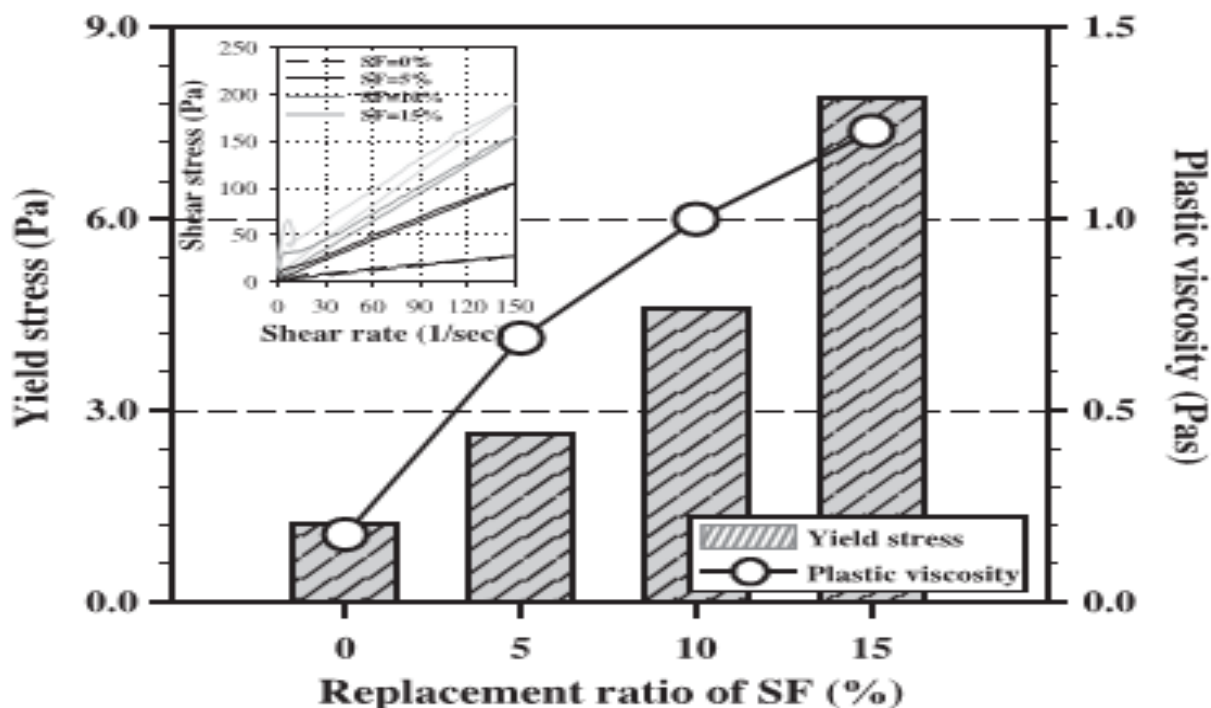


Figure 2.15: Effets de la fumée de silice sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment (Park et col., 2005).

Par ailleurs, Aitcin et col. (1990) ont remarqué pour les mélanges non adjuvés que la viscosité a tendance à s'accroître en augmentant le dosage de la fumée de silice.

De Larard et col. (1986) ont montré, avec les résultats présentés sur la (figure 2.15), que l'amélioration de la maniabilité des mortiers et des bétons dépend de la quantité qui est fonction de la nature de la fumée de silice incorporée dans le mélange.

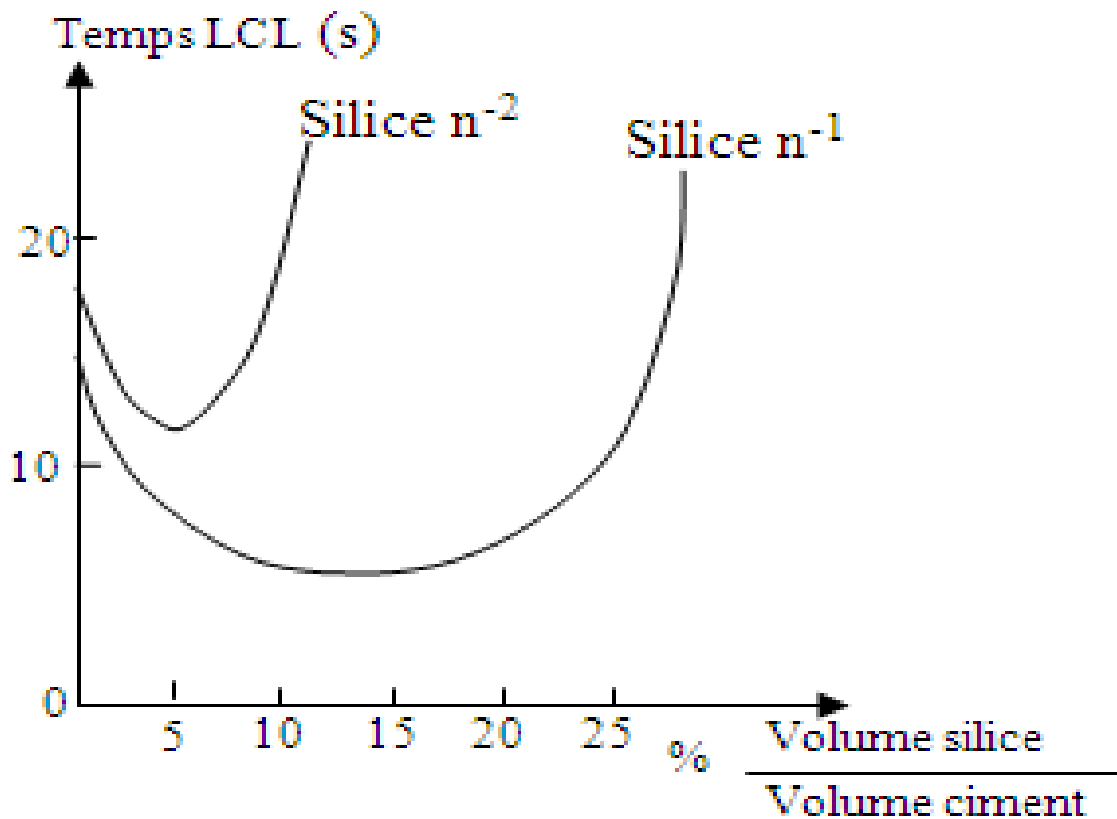


Figure 2.16 : Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier (De Larard et col., 1986).

Chen et col. (2012) ont montré que la distribution granulaire de la fumée de silice est différente à celle du ciment qui l'amène à améliorer la compacité de la matrice cimentaire et réduire le volume des vides.

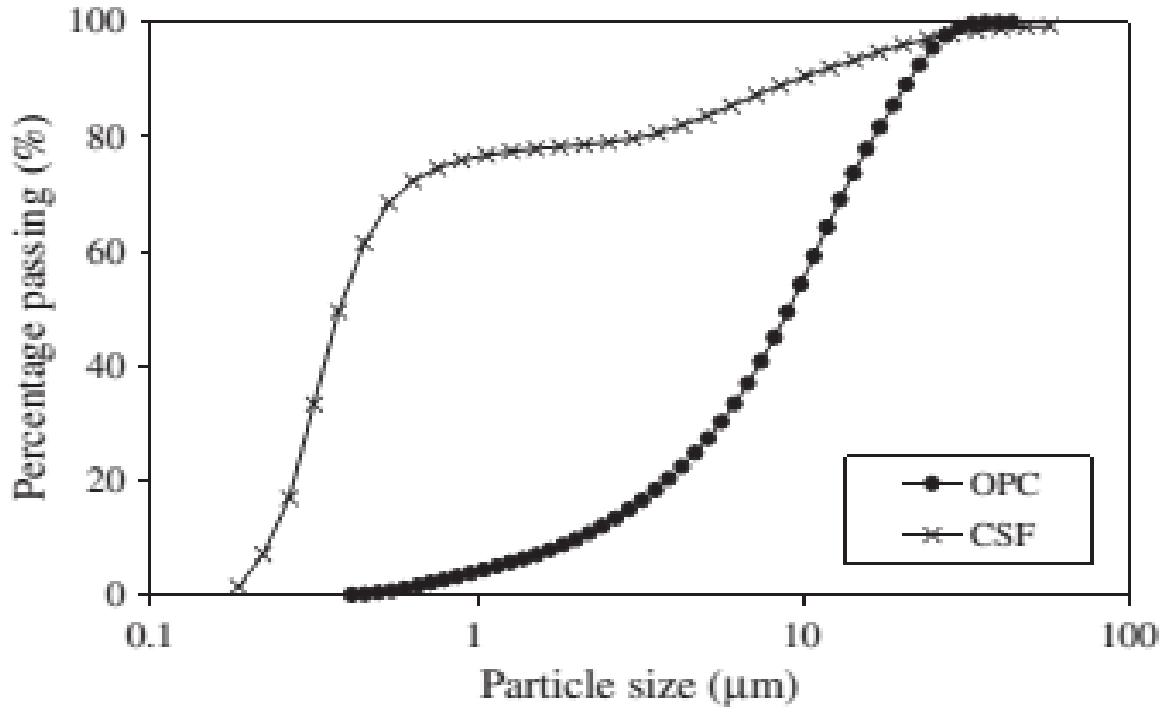


Figure 2.17 : Comparaison entre la distribution granulaire du ciment et de la fumée de silice (Chen et col., 2012).

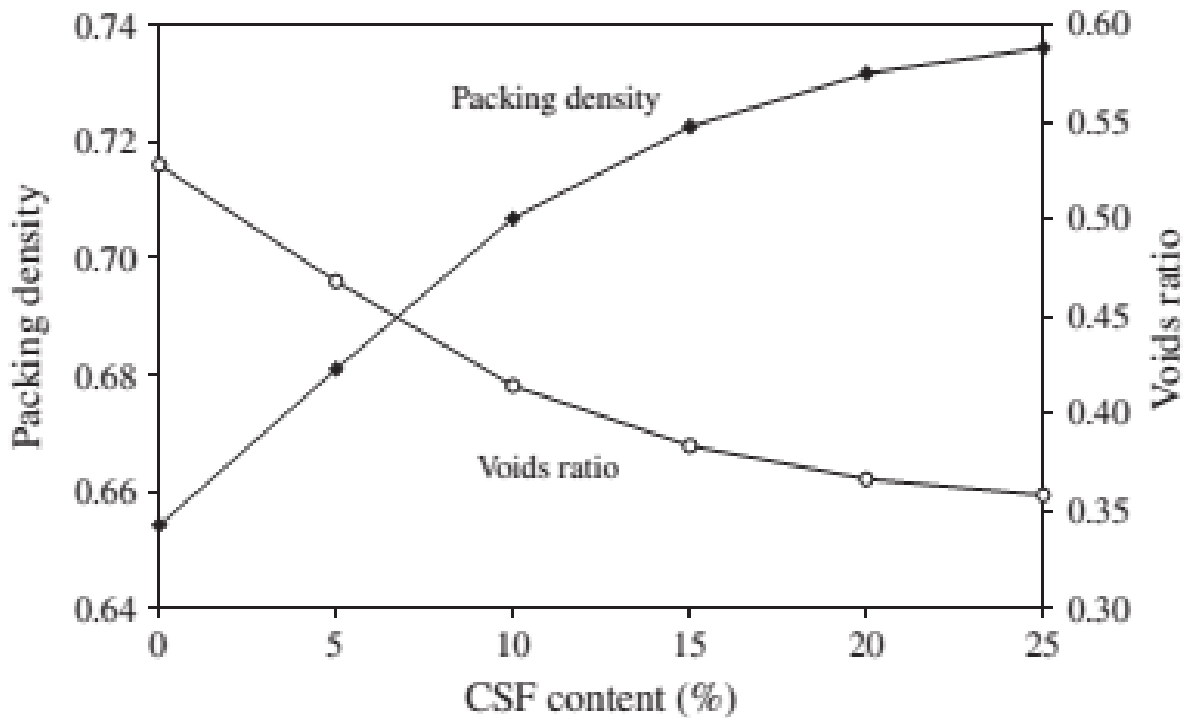


Figure 2.18. Effet de la teneur de la fumée de silice sur la compacité (Chen et col., 2012).

Cette amélioration provoque la libération de l'eau piégée et réduire, jusqu'à un certain seuil, la viscosité apparente des mélanges (figure 2.17).

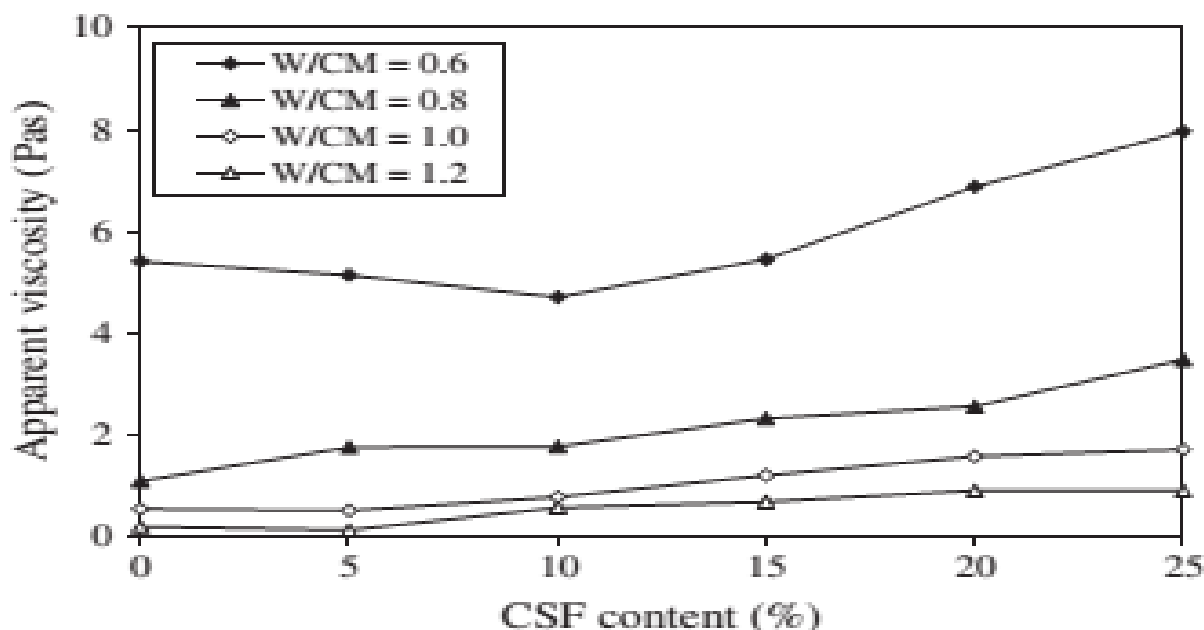


Figure 2.19. Effet de la teneur de la fumée de silice sur la viscosité (Chen et col., 2012).

II.2.5. Effet des cendres volantes :

Les cendres volantes sont des fines particules résultant de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Leurs particules ont une forme sphérique avec un diamètre variant de 1 à 150 μm conformes à la norme EN 450.

C'est un matériau inorganique fin qui a des propriétés pouzzolaniques à long terme. La cendre volante silico-alumineuse (classe F) est principalement vitreuse. Elle peut contenir des phases cristallisées comme le quartz, la mullite, la gehlénite, des spinelles. Pouzzolanique, elle met du temps à réagir. Sa combinaison avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment commence à 28 jours. Ainsi, l'ajout de cendre volante réduit le risque de fissuration due à l'élévation de température lors de l'hydratation du ciment.

Plusieurs recherches ont montré que l'introduction de cendre volante dans les B.A.P. améliore les propriétés rhéologiques et réduit le dosage en superplastifiant utilisé pour obtenir un étalement similaire à celui d'un béton autoplaçant sans ajouts. Cependant, la substitution d'une partie du ciment par les cendres volantes à une faible influence sur le seuil et la viscosité des pâtes cimentaires (Park, 2005).

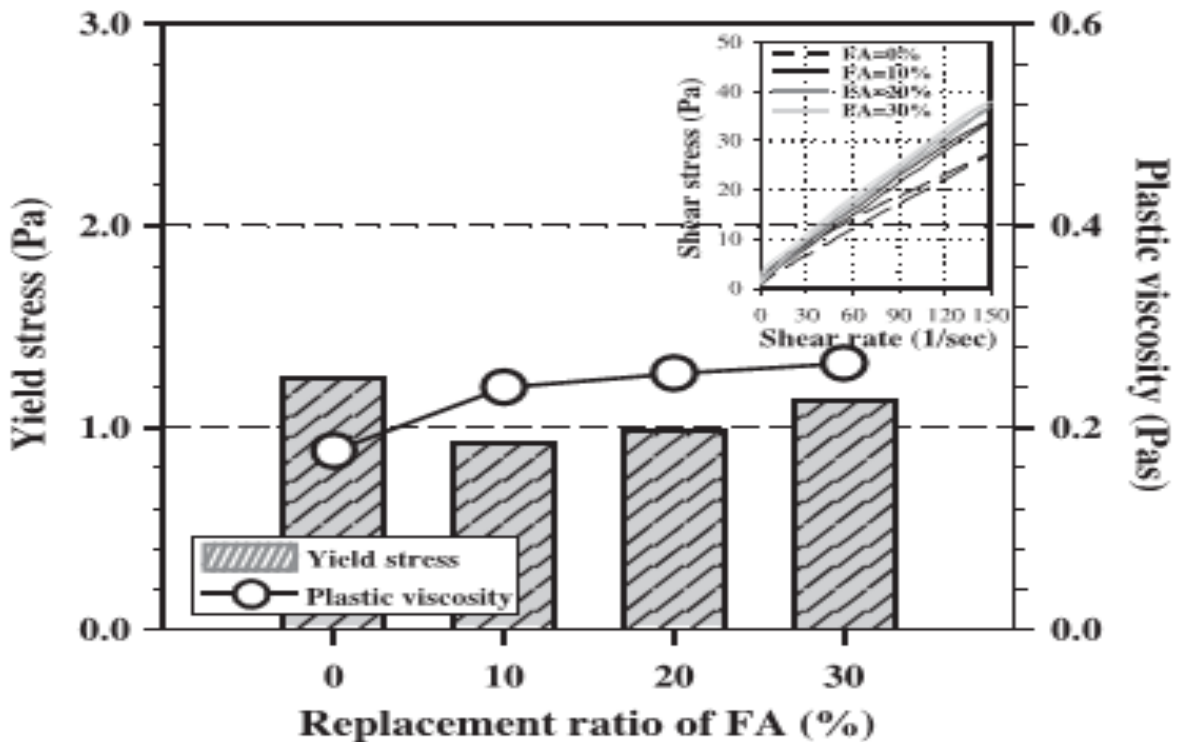


Figure 2.20 . Effet de la cendre volante sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment (Park et col., 2005)

Les cendres volantes permettent d'améliorer la maniabilité d'une part (Domone, 2006), et d'autre part, la fluidité parce que la forme sphérique non poreuse des particules mène à réduire l'interaction entre les grains de ciment et facilite l'empilement granulaire (Nanthagopalan et col., 2008).

Par la suite, la demande en eau des cendres volantes est plus faible que celle du ciment ce qui permet de réduire la viscosité et d'améliorer les propriétés mécaniques du béton.

Les résultats présentés sur la figure 2.20 montrent que l'utilisation des cendres volantes dans une formulation de béton conduit à la réduction progressive du dosage en eau pour une même consistance en raison de la morphologie des particules de cendres volantes (Boudchicha, 2007).

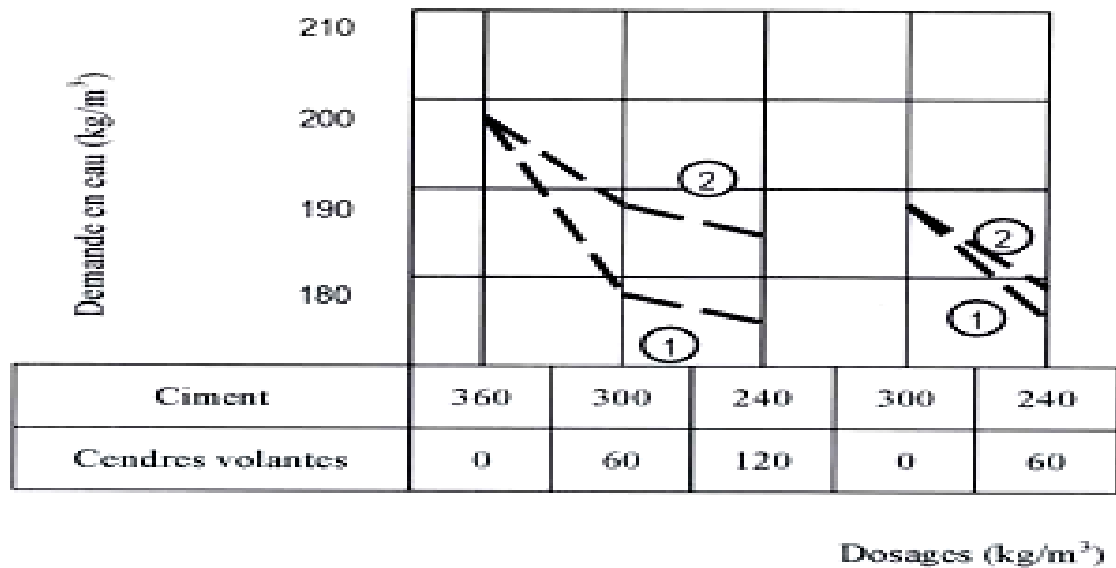


Figure 2.21 : Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes 1 et 2 dans une formulation de béton pour une même consistance (Boudchicha, 2007).

Associées à un superplastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité si le rapport E/C est suffisamment important (équivalent à E/C utilisé pour l'échantillon témoin) sinon, la demande en adjuvant augmente fortement (Ferraris, 2001).

Banfill cité dans Naji (2009) a constaté que la substitution jusqu'à 60% du ciment par des cendres volantes réduit le seuil de cisaillement avec un faible effet sur la viscosité plastique. Néanmoins, Assaad et col. (2003) ont trouvé que l'incorporation des cendres volantes engendre des frictions internes de la pâte, ce qui implique l'augmentation du seuil de cisaillement. Les cendres volantes peuvent également réduire la ségrégation et améliorer la stabilité (Shadle et col., 2002).

II.2.6. Effet des laitiers des hauts fourneaux :

Les laitiers de hauts fourneaux sont des résidus minéraux de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Ils contiennent de la chaux (45 à 50%), de la silice (25 à 30%), de l'alumine (15 à 20%) et environ 10% de magnésie. Une fois sorti du four, le laitier subit un refroidissement rapide avec un jet d'eau qui lui donne

une structure vitreuse apte à réagir en présence de l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment. Il est broyé et ajouté en proportions variables au clinker. Conforme à la norme EBS 6699. Étendue à travers le monde à cause de ses performances mécaniques, de son économie et de sa valeur écologique.

Le laitier augmente significativement les performances mécaniques et la durabilité à long terme du béton (Lim, 2000). Le laitier améliore la fluidité du béton (Wainwhrigt, 2000), (Boukendakdji, 2009).

Atzeni et col. (1986) ont trouvé que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique peuvent augmenter ou diminuer avec un additif de laitier. Cela dépend de la relation entre la surface spécifique du ciment et du laitier. Par contre, Park et col. (1998) ont observé que le remplacement du ciment par le laitier de haut fourneau peut réduire à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité de la pâte de ciment.

Boukendakdji et col. (2009) ont remarqué qu'une substitution jusqu'à 20% du ciment par le laitier permet d'améliorer la maniabilité.

L'addition du laitier de haut fourneau avec une large distribution granulométrique améliore la compacité du mélange et augmente la quantité de l'eau libre ce qui offre un bon comportement rhéologique des ciments composés (Adjoudj, 2013).

Grzeszczyk et Janowska-Renkas (2012) ont montré que la granulométrie du laitier à haut fourneau a une influence considérable sur la rhéologie, ils ont trouvé que le laitier à haut fourneau de particules très fines ($< 20\mu\text{m}$) conduit à la réduction progressive de la viscosité plastique (figure 2.21)

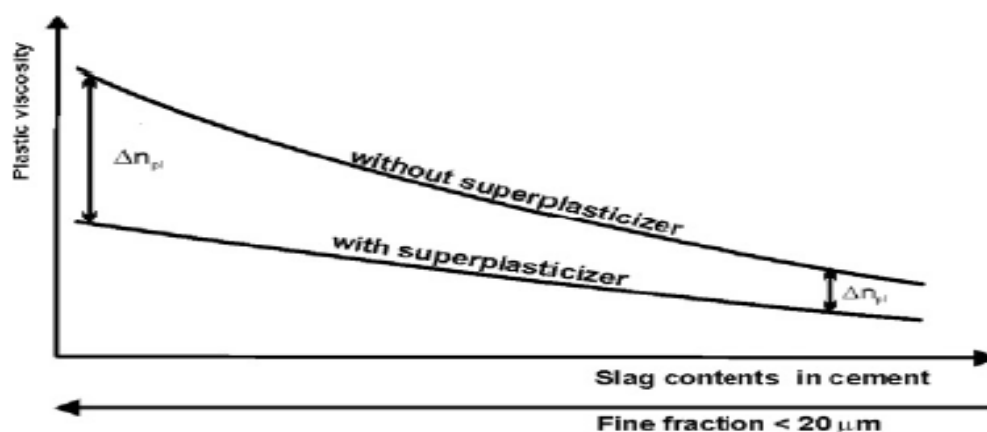


Figure 2. 22 : L'influence du laitier à haut fourneau et les fractions fines dans le ciment (C1) sur la viscosité plastique des pâtes avec et sans superplastifiant (Grzeszczyk et Janowska-Renkas, 2012)

Shi et col. (1998) ont remarqué que le laitier de haut fourneau adsorbe le superplastifiant, ce qui permet d'augmenter la demande en superplastifiant pour obtenir une même fluidité ou une même valeur du seuil de cisaillement.

Park et col. (2005) ont trouvé par des études que la viscosité plastique et le seuil de cisaillement augmentent en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier des hauts fourneaux (figure 2.22).

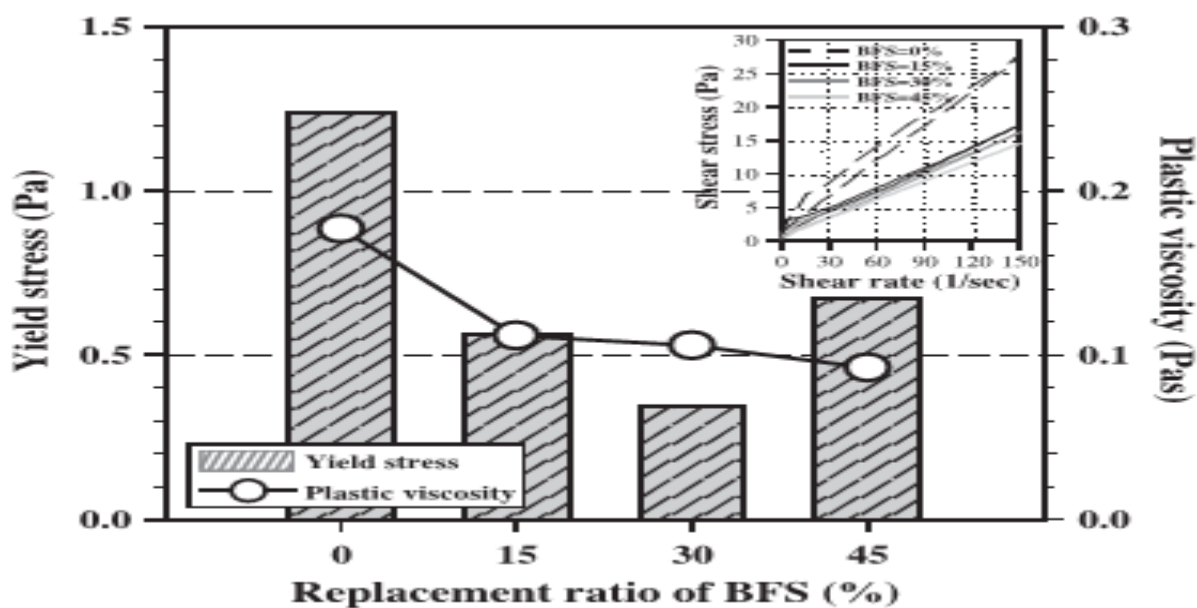


Figure 2.23 : Effets du laitier des hauts fourneaux sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment

II.3. Autres paramètres influant sur la rhéologie :

II.3.1. Effet du rapport E/C :

Le rapport E/C influe principalement sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Avec l'augmentation du rapport E/C la viscosité et le seuil de cisaillement augmentent [Wallevik, 2011].

La figure 2.23 montre l'influence du rapport E/C sur les propriétés rhéologiques du béton [Domone, 1999], [Banfield, 2011].

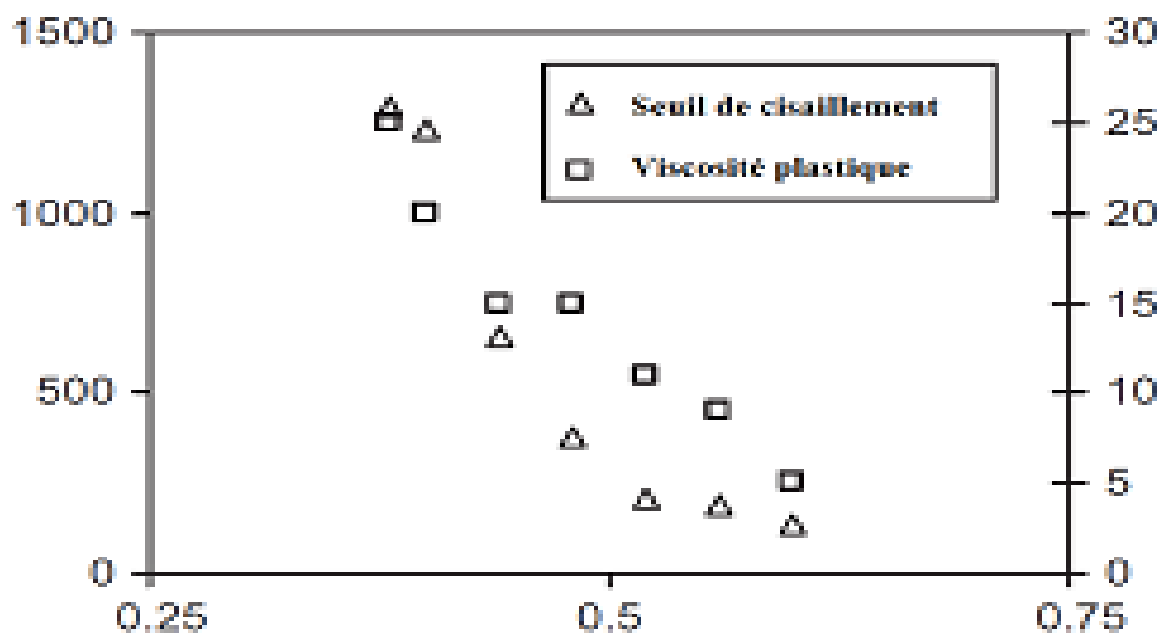


Figure 2.24 : Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons
[Banfield, 2011]

II.3.2. Effet de la nature du ciment :

Greszczyk et Kucharska (l'année) ont montré que le seuil de cisaillement d'une pâte de ciment varie avec sa teneur en alcali et en C_3A [Greszczyk, 1991]. Cette étude fut complétée par Suhr [S.Suhr, 1991], qui a montré que le seuil de cisaillement augmente proportionnellement avec la teneur en C_3A et diminue quand la concentration en SO_3 augmente (Figure 2.24).

D'après Asakusa et Yoshika (1992) la viscosité des pâtes de ciment augmente sensiblement quand le ciment a un faible rapport C_3S/C_2S ou C_3A/C_4AF ou lorsqu'un superplastifiant de type PNS est employé.

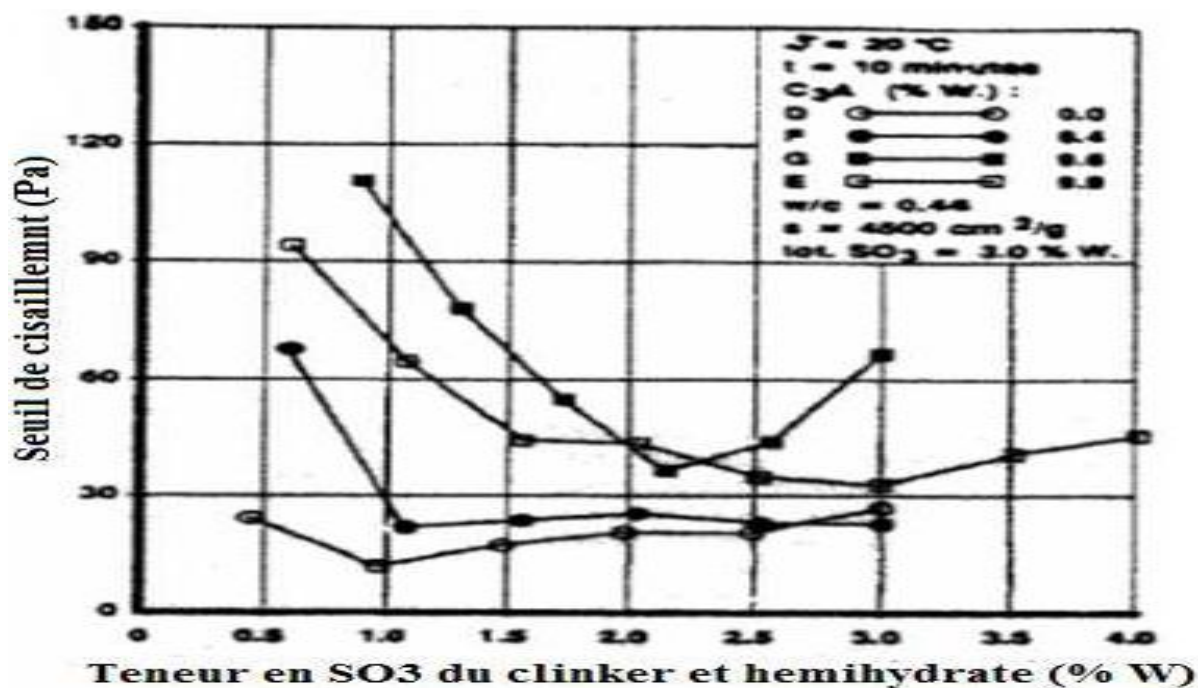


Figure 2.25 : Effet de C_3A et de SO_3 sur le seuil de cisaillement [Suhr, 1991]

II.3.3. Effet des fibres :

Une étude menée par Adjoudj (2013) a montré que la viscosité plastique et le seuil de cisaillement augmentent avec la teneur en fibres.

Par ailleurs, il a aussi été trouvé que l'utilisation de fibres plus longues augmente le seuil de cisaillement des mélanges.

II.3.4. Effet du temps :

La quantité d'hydrates augmente avec le temps. L'étude menée par [Golaszewski, 2003] montre qu'il y a une augmentation du seuil de cisaillement et une stabilité de la viscosité plastique au cours de la première heure (figure 2.25).

La durée de la période où le béton frais reste suffisamment maniable est limitée dans le temps à cause du processus d'hydratation, l'avancement de la réaction d'hydratation engendre un accroissement de la formation d'ettringite, il en résulte une élévation des valeurs du seuil de cisaillement et la viscosité plastique avec l'avancement de la réaction cisaillement et la viscosité plastique avec l'avancement de la réaction

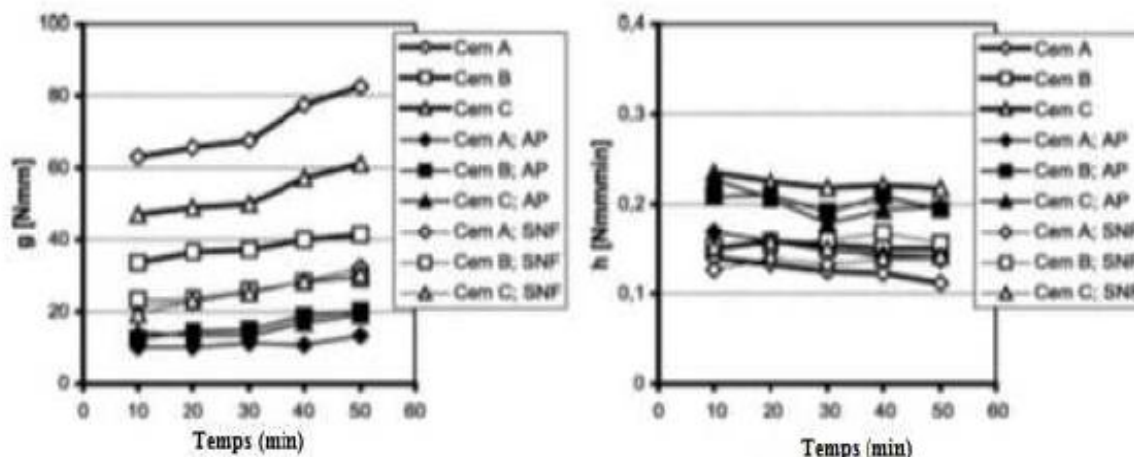


Figure 2.26. Variation de g et h avec le temps sur des bétons faiblement fluidifiés, composés de différents liants et à 20° C [Golaszewski, 2003]

II.3.5. Effet de la température :

Golaszewski et Szwabowski (2003), ont remarqué une forte influence de l'élévation de la température sur le comportement rhéologique des mortiers. Et cela est accompagné d'une augmentation du seuil de cisaillement et d'une diminution de la viscosité plastique.

II.3.6. Effet du malaxage :

Banfill et Kitching (1991) ont montré que l'augmentation de la vitesse du malaxage d'un mortier dans un rhéomètre accélère l'hydratation du ciment. Le taux d'accroissement du moment de cisaillement engendre une augmentation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité. En effet l'hydratation entraîne via la formulation de semi hydrate et de chaux, une augmentation de la teneur en solide parallèlement, l'énergie apportée par le malaxage augmente le temps du mélange ce qui engendre une diminution du seuil de cisaillement et une augmentation de la viscosité plastique.

II.3.7. Effet de la vibration :

Selon certains auteurs [Tattersall, 1979], le seuil de cisaillement disparaît pendant la vibration. Le comportement du mélange ne serait plus Binghamien et obéirait bientôt à une loi de puissance analogue à un corps pseudo plastique.

D'autres recherches effectuées par ces mêmes auteurs [Tattersall, 1989] montrent que le comportement devient Newtonien pour certaines fréquences de vibrations.

III. Phénomènes perturbateurs :

III.1. Dimensions du rhéomètre :

La dimension de la géométrie de l'écoulement doit être d'un ordre de grandeur plus important que la taille des éléments constitutifs du matériau.

La pratique veut que l'écart minimal entre les cylindres doit être supérieur à au moins dix fois la taille des plus grosses particules en suspension [Atzeni et col., 1985].

III.2. Glissement aux parois :

ce phénomène a pour conséquence de diminuer la viscosité mesurée par rapport à sa valeur réelle du fait de la décroissance naturelle de la concentration solide près d'une paroi lisse [Grissier, 2002], [Goussot et Ancey, 1999].

III.3. Evaporation :

L'évaporation intervient surtout dans les suspensions lors d'essais comportant une surface libre, ce qui pourra se traduire par une diminution de la viscosité apparente mesurée [Atzeni et col., 1985].

Références bibliographiques

- ADJOUDJ, M. EZZIANE, K. KADRI, EH. « Effet de l'élévation de la température sur l'efficacité d'un superplastifiant à base de naphthalène sulphonate en présence d'un ciment composé », Revue Nature & technologie, A-Sciences fondamentales et Engineering, n°08/janvier 2013.P 35-40
- Aïtcin, PC. "*Les Superplastifiants : des Réducteurs d'eau pas comme les autres*", Recueil de conférences présentées à l'Université de Sherbrooke, 1990.
- Asakura, E. Yoshida, H. Nakae, H. «Influence of superplasticizer on fluidity of fresh cement paste with different clinker phase composition», Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cements, New Delhi IV; 1992, pp.570-576. Experience, CBI report 2:99, 80p, 1999.
- Assaad, J. Khayat, K.H. Mesbah, H. 2003. « Assessment of thixotropy of flowble and self-consolidating concrete», ACI Materials Journal, vol. 100, page 99-107.
- Atzeni, C. Massidda, L. Sanna, U. « Comparison between rheological models for Portland cement pastes», Cement and concrete research, vol. 15,1985, pp.511-519.
- Banfill, P. «Additivity effects in the rheology of fresh concrete Containing water-reducing admixtures» Construction and Building Materials, vol. 25(6), pp. 2955-2960, 2011.
- Banfill, P.F.G. Chapman and Hall, Liverpool, pp. 27-36, 1991.
- Banfill, PFG. "*A discussion of the papers. Rheological properties of cementmixes*", by Daimon, and Roy, Cement and concrete research, vol. 9(6), 1979, pp. 795–6.
- Belaidi, A. Brixi, A. « Etude de l'influence des additions et des adjuvants sur les propriétés aux états frais et durci des bétons », mémoire, soutenue en2014.Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.139p.
- Bellifa, S. « Evolution de la porometrie des pates autoplaçantes ».Universite abou bekr belkaid - Tlemcen faculté de technologie département de génie civil, mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en génie civil, 2012, 75 p.
- Bensebti S.E., 2008 : "Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base
- Bessa-Badreddine, A. « Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers », Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, 2004,236 p.

- Billberg, P. "Influence of filler characteristics on SCC rheology and early Nd hydration", Proceedings of 2 International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 octobre 2001.
- Bjömström J. et Chandra, S. «Effect of superplasticizers on the rheological properties of ciments», Materials and Structures / Matériaux et Constructions, vol. 36, 2003, pp.685-692.
- Bonavetti, V. Donza, H. Rahhal, V. Irassar E. «Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement», Cement and concrete research, vol 30,2000, pp. 703-8.
- Boudchicha, A. « Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons » Thèse de doctorat de l'université de mentouri Constantine, 2007, 294 P.
- Bouhamou, N. Belas, N. Mesbah, H. Mebrouki, A. Yahia , A. 2008. « Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais », Afrique Science, vol. 4, page 1-20.
- Boukendakdji, O. Kenai, S. Kadri ,E.H. and Rouis, F. "Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete". Construction and building materials, vol 23(7), 2009, pp.2593–8.
- Bouras,R,Rheologie des pates cimentaires pour beton autoplaçant ,Tizi ouzou ,Genie mecanique,2011.
- Carlsward, J. Emborg, M. Utsi, S. Oberg, P. 2003. «Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete», proceeding of the 3rd international RILEM conference on self-compacting concrete, Island, page 143-153. CEBTP, 46pages.
- Chen, J. Fung, WWS. Kwan, AKH. «Effects of CSF on strength, rheology and cohesiveness of cement paste», Construction and Building Materials, vol 35,2012, pp. 979–987
- Chiochio,G. and Paoilini, AE. «Optimum time for adding superplasticizers to portland cement pastes», Cement and concrete research, vol. 15,1985, pp. 901-8.
- Coussot, P. Ancey, C. "*Rhéophysique des pâtes et des suspensions*", EDP, Sciences (1999).

- De Larrard, Moreau, F. A. Buil M. Paillere , AM. «Improvement of mortars and concretes really attributable to condensed silica fume». 2nd International conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans, Madrid vol 2,1986, pp.959-71.
de matériaux locaux". Thèse de doctorat, Université Mentouri-Constantine Algérie.
- Diamantonis, N. Marinos, I. Katsiotis, M.S. Sakellariou A. Papathanasiou ,A. Kaloidas, V. Katsioti, M., 2010: Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete, Construction and Building Materials, vol. 24, page 1518–1522.
- Domone, P. Xu ,Y. and Banfill, P. «Developments of the Two-Poin Workability Test for High-Performance Concrete» Magazine of Concrete Research, vol. 51, pp. 181-190, 1999.
- Domone, P. 2006: Self-compacting concrete: an analysis of 11 years of case studies, Cement and Concrete Composites, vol.28, page 197-208.
- El Hilali, A. « Experimental study of the rheological behavior and self-compacting concrete (SCC): Influence of limestone and fine plant fibers". MSc thesis. France: University of Cergy Pontoise; 2009, p.183.
- Esping, O. Effect of limestone filler BET (H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research 38, p938-944, 2008.
- Ferraris, C.F. Obla, K.H. Hill, R. 2001. « Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete», Cement and concrete research, vol.31, page 245-255.
- FILLTECH, « Technologie des bétons liée à l'utilisation de fillers calcaires ». Valorisation de ceux-ci par une utilisation dans les bétons, 2007.
- Flatt, R.J. Houst, Y.F. "A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizer", Cement and concrete research, vol. 31, 2001, pp. 1169-76.
- Golaszewski, J. and Szwabowski, J. «Influence of superplasticizer on rheological behaviour of fresh cement mortars» Cement Concrete Research , vol. 34(2), pp. 235-248, 2003.
- Greszczyk, S. Kucharska, L. «The influence of chemical composition on Rheological properties» Rheology of fresh cement and concrete, Ed.

- Griesser, A. « Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures: rheology, phase composition, pore water and heat of hydrations of cimentitious systems », Thèse de doctorat de l'Institut de Technologie Fédéral, Suisse; 2002, 147p.
- Grzeszczyk ,S. Janowska-Renkas , E. "The influence of small particle on the fluidity of blast furnace slag cementpaste containing superplasticizers" *Construction and building materials*, vol 26(1),2012, pp.411–5.
- Halla ,A . Kadri, EH. Ezziane,K. Kadri, A. Khelafi ,H. «Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste», *Construction and building materials*, vol 24(8),2010, pp.1418–23.
- Hasni L. (1999) : *Bétons autoplaçants – synthèse bibliographique*. Rapport n°9004/98006
- Hu, C. « Rhéologie des bétons fluides », Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France OA16, 1995, 203 p.
- Husson , S. Gullhot ,B. Pera, J. Influence of different fillers on the hydration of C3S, *Proceedings of the 9th ICCI, New Delhi*, vol4, 1992.
- Kakali ,G. Tsvilis,S. Aggeli, E. Batis , G. « Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO₃, *Cement and concrete research* 30, p1073-1077,
- Khayat, KH. «Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials - An overview», *Cement and concrete composites*, vol. 20(2-3), 1998, pp. 171-188.
- Kim, BJ. « The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste, *Cement and concrete research*, vol. 30, 2000, pp. 887-93.
- Lachemi, M. Hossain, KMA. Ambros, V. Nkinamubanzi,PC. Bouzoubaâ ,N. "Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste", *Cement and concrete research*, vol. 34(2), 2004,pp.185-193.
- Legrand, C. « Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais », Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 1971.
- Lessard, M. "*Using superplasticizers in high performance concretes*", *Proceedings conference*, Sherbrooke, Canada, 1990, pp 65-83.

Materials containing mineral admixtures, *Cement and Concrete Research*, vol.35, page 842-849.

- Menendez, G. Benedetti, V. Irassar, EF. "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag", *Cement and concrete composites*, vol 25, 2001, pp. 61–7.
- Michel ,F. Pierard, Courard ,L. Pollet ,V., Influence of physic-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances, *Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC*, p205-210, 3-5 September 2007, Ghent, Belgium.
- Naji , S . 2009 : "Développement d'essais pour évaluer la thixotropie et la robustesse des bétons autoplaçants", mémoire de maîtrise en sciences appliquée en Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- Nanthagopalan, P. Haist , M. Santhanam, M. Müller, H.S., 2008: Investigation on the influence of granular packing on the flow properties of cementitious suspensions *Cement and Concrete Composites*, vol.30, page 763–768.
- Neubauer, CM. Yang, M. Jennings, HM «Interparticle potential and sedimentation Behavior of cement suspension». *Effects of admixture*, *Advanced Cement Based Materials*, vol. 8(1), 1998, pp. 17-27.
- Neville, A.M « Propriétés des bétons, Traduction de CRIB, Sherbrooke », Canada, Ed. Eyrolles, Paris, 806 pages, 2000.
of ultrafine particles, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 5, p687–697,
- Park, CK. Noh, MH. Park, TH. «Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures». *Cement and concrete research*, vol. 35,2005, pp.842–49.
Powder -Experimental study and numerical simulation, *Proceedings of the 11th ICCR*, Durban, 2003.
- Ramachandran, VS. Malhotra, VM. Jolicoeur,C. Spiratos, "*Superplasticizer properties and applications in concrete*", CANMET, Ottawa, Canada, 1998.pp.
- Şahmaran, M. Özkan, N. Keskin, SB.,Uzal, B. Yaman, İÖ. Erdem, TK. "Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts", *Cement and concrete research*, vol. 38(7), 2008, pp.930 –7.

- Shadle, R. & Somerville S., 2002: The Benefits of Utilizing Fly Ash in Producing Self-Compacting Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, IL: ACBM, page 235-241. S.N. Lim, T.H. Wee «Autogenous shrinkage of ground-granulated blast-furnace slag concrete» ACI Materials Journal, 97 (5), pp.587-593, 2000.
- 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.
- Shindoh, T. and Matsuoka, YH. "*Development of combinaison type self compacting concrete and Evaluation test methodes*", Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 1(1), 2003, pp. 26-36.
- Sugamata, T. Hibino, M. Ouchi, M., Okamura, H. "*A study of particle dispersion effect of polycarboxylate-based superplasticizers*", Transactions of the Japan Concrete Institute, vol. 21, 1999, pp. 7-14.
- Suhr, S. «Interaction between sulfate minerals and C3A in cement paste rheology» Rheology of fresh cement and concrete, Ed. Banfill P. F. G., Chapman and Hall, Liverpool, pp. 47-56. 1991.
- Taleb, O. 2009 : Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux, mémoire de magister de l'université de Tlemcen, Algérie.
- Tattersall G. and Bloomer, S. «Further development of the two-point test for workability and extension of its range». Magazine of Concrete Research, vol. 31, pp. 202-210, 1979.
- Tattersall, GH. «Workability and quality control of concrete», London, E & FNSPON, 1991, 262 p.
- Turcry, Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation, thèse de doctorat de l'École centrale de Nantes, 2004, 213 pages.
- Uchikawa, H. Hanehara, S. Shirasaka, T. Sawaki, «Effect of admixture on hydration of cement», adsorptive behaviour of admixture and fluidity and setting of fresh cement paste, Cement and concrete research, vol. 22, 1992, pp. 1115-1129.
- Venuat, M. – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition 2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.

- Wainwright, P.J. Rey, N. «The influence of ground granulated blast furnace slag additions and time delay on the bleeding of concrete» *Cement and Concrete Research*, 22 (4), pp. 253-257, 2000.
- WALLEVIK ,O.H. et WALLEVIK ,J.E. rheology as a tool in concrete science: the use of rheographs and workability boxes .*cement and concrete research*,2011,41,1279-1288
- Wallevik, J. «Relationship between the Bingham parameters and Slump» *Cement and Concrete Research*, vol. 36(7), pp. 1214-1221, 2006.
- Yahia, A. Tanimura, M. 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, page 532– 539.
- Yamine, J. « Rhéologie des bétons fluides à hautes performances », relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques » thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure De Cachan, 2007.
- Ye , G. Liu , X. De Schutter , G. Poppe, A.M. Taerwe , L . « Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes», *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 94–102 .
- Younsi ,A .« Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales » thèse de doctorat, université de la Rochelle, 2012.
- Zhang, X. Han, J. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste", *Cement and concrete research*, vol. 30(5),:2000,pp. 827–30.

Chapitre III



Matériaux et méthodes

Résumé

Ce chapitre résume les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans notre étude. Nous présenterons ensuite l'ensemble des démarches expérimentales réalisées qui permettent de déterminer les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité) et mécaniques recherchés.

Sommaire du chapitre 3

I.	Caractérisation des matériaux.....	51
II.	Composition des mortiers.....	55
III.	Démarches méthodologiques.....	58
IV.	Essai de la résistance mécanique.....	65
	Références bibliographiques.....	67

I. Caractérisation des matériaux :

I.1. Le sable :

Le sable utilisé provient de la carrière de Sidi Abdelli, propriété de l'entreprise nationale des granulats (ENG).

I.1.1. Les caractéristiques physiques du sable :

Les caractéristiques physiques du sable sont représentées dans le tableau 3.1 suivant :

Tableau 3.1. Caractéristiques physiques du sable.

M_v apparente (Kg/m^3) (NA 255)	1583.46	
M_v absolue (Kg/m^3) (NA 255)	La méthode de l'éprouvette graduée	2542.37
	La méthode du ballon	2648.6
Équivalent de sable (%) (NFP 18-598)	ESV	82,56
	ESP	79.59
Module de finesse	2.82 (Sable grossier)	
Coefficient d'absorption (%) (NF P 18-555)	1.45	

I.1.2. Analyse granulométrique :

Pour caractériser le sable, nous avons fait l'essai de l'analyse granulométrique selon la norme (NF P18-540). La courbe granulométrique du sable est représentée sur la figure 3.1.

Tableau3.2. Analyse granulométrique du sable

Sable 0/4				
La masse de l'échantillon = 1 kg				
Ouverture de tamis (mm)	Masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés (%)
6,3	0,6	0,6	0,06	99,94
5	0,6	1,2	0,12	99,88
4	31,2	32,4	3,24	96,76
3,15	50,2	82,6	8,26	91,74
2,5	96,2	178,8	17,88	82,12
2	86	264,8	26,48	73,52
1,6	112,8	377,6	37,76	62,24
1,25	61,4	439	43,9	56,1
1	64,4	503,4	50,34	49,66
0,8	45,6	549	54,9	45,1
0,63	52,2	601,2	60,12	39,88
0,5	71,2	672,4	67,24	32,76
0,4	39,2	711,6	71,16	28,84
0,315	62,8	774,4	77,44	22,56
0,250	4,2	778,6	77,86	22,14
0,2	17,6	796,2	79,62	20,38
0,16	37,2	833,4	83,34	16,66
0,125	15,8	849,2	84,92	15,08
0,08	16,8	866	86,6	13,4
Fond	134	1000	100	0

A partir des résultats trouvés (tableau 3.2), nous constatons que le sable est composé de 13.4% de particules inférieures à (80 μ m).

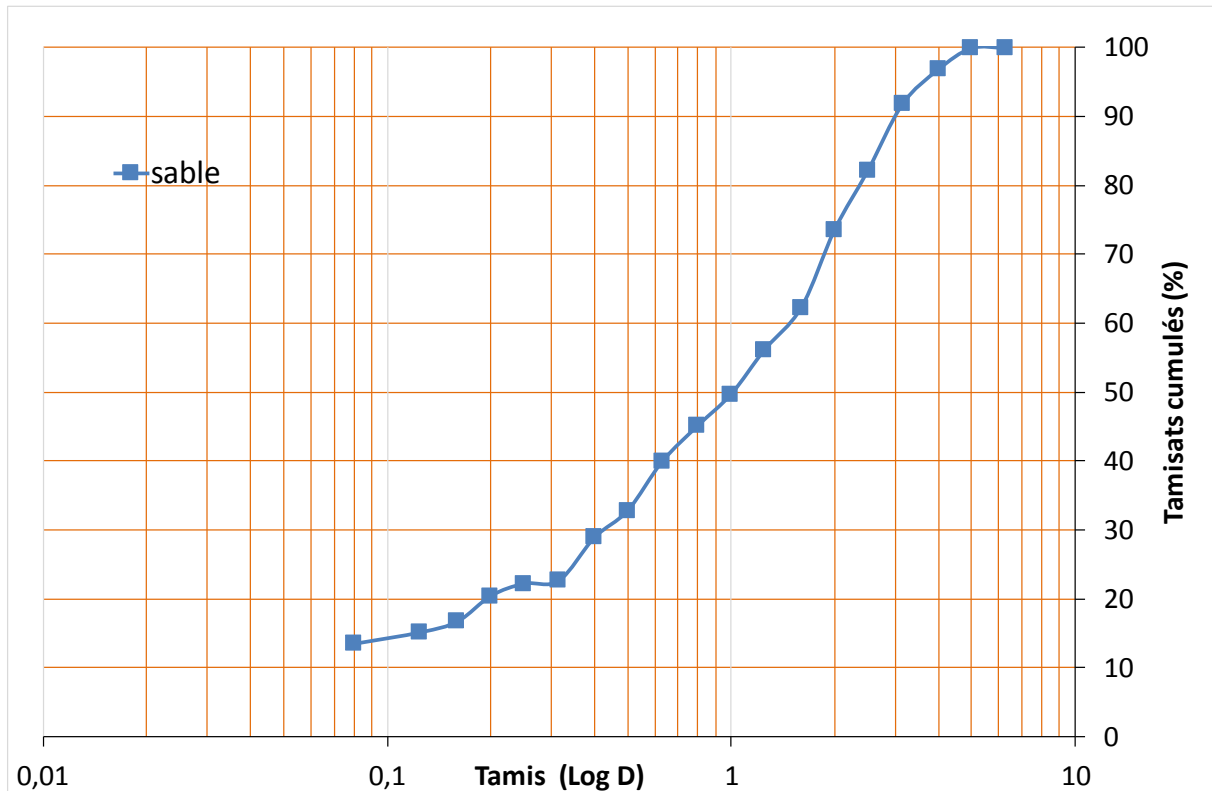


Figure 3.1. Courbe granulométrique du sable.

I.2. Le ciment :

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ CEM II 42.5/A de la Société des Ciments de Béni-Saf appartenant à la wilaya d'Ain-Temouchent. Ce ciment est conforme à la norme (NF EN 196), Il est composé de 85% de clinker ; 3% de gypse, 10% de pouzzolane et de 2% de calcaire sableux.

Les détails des propriétés chimiques et physico-mécaniques de ce ciment sont présentés dans les Tableaux 3.3, 3.4 et 3.5.

Tableau 3.3. Composition chimique du ciment (%) (SCIBS, 2014 ?).

	Valeur Mini	Valeur Maxi	Valeur Moy	Norme NA 442
Perte au feu	1.44	2.48	1.91	-
CaO Libre	0.63	1.47	0.90	-
SiO ₂	25.03	29.92	27.17	-

Al₂O₃	5.15	5.77	5.47	-
Fe₂O₃	3.05	3.27	3.17	-
CaO	53.63	59.70	57.20	-
MgO	0.96	1.07	1.01	≤ 5
SO₃	2.02	2.62	2.27	≤ 3.5
Chlorures	0.005	0.008	0.006	≤ 0.1
Insolubles	6.25	8.39	7.66	-

Tableau 3.4. Composition minéralogique du ciment (%) (SCIBS,2014)

C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
52.63	23.68	8.66	10.71

Tableau 3.5. Propriétés physico – mécaniques du ciment (SCIBS).

Surface spécifique Blaine (cm²/g)	3649
Consistance (%)	26.32
Expansion à chaud (mm)	0.36
Début de prise (mn)	140
Résistance à la flexion	
02 jours (bars)	4.11
07 jours (bars)	5.91
28 jours (bars)	7.24
Résistance à la compression	
02 jours (bars)	16.94
07 jours (bars)	31.67
28 jours (bars)	46.02
La masse volumique apparente (Kg/m³)	932
La masse volumique absolue (Kg/m³)	3032

I.3. Les additions minérales :

- Les fillers calcaires proviennent de la carrière de Sidi Abdelli (ENG). Ces fines ont un $d_{\max} = 125\mu\text{m}$ et présentent une masse volumique absolue égale 2700 kg/m^3 .
- La pouzzolane utilisée provient d'une roche naturelle volcanique de la région de Béni Saf. Elle est finement broyée et tamisée à $125\mu\text{m}$. Elle présente une masse volumique de 2775kg/m^3 .
- La poudre de marbre présente une masse volumique absolue de 2650 kg/m^3 .

I.4. Les additions organiques :

- « ORAFLOW HM 13600 » sont des superplastifiants non chloré de nouvelle génération, haut réducteurs d'eau pour les bétons à faible rapport E/C, de la famille d'éther polycarboxylique modifié et conçues pour les bétons à haute qualité de performance et d'ouvrabilité. Ils sont caractérisés d'une couleur brune et présentent une masse volumique de $1,05\pm 0,02\text{g/cm}^3$. Leur teneur en extrait sec est de $22\pm 1\%$ et en chlorure est inférieure à $0,1\%$.
- « ORAFLOW HM 17200 » sont des superplastifiants haut réducteurs d'eau de la famille des polycarboxylates dit 3^{ème} génération et recommandés pour les bétons prêts à l'emploi, les chantiers et travaux public. Ils sont caractérisés d'une couleur brune claire et présentent une densité de $1,06\pm 0,01$. Leur teneur en Na_2O est inférieur à 1% .

II. Composition des mortiers :

Les essais sont effectués sur un mortier normalisé ayant une composition standard de ciment, sable et eau tel que le rapport pondéral : ciment: sable: eau est égal à 1:3:0.55. Afin d'avoir la quantité nécessaire pour effectuer l'ensemble des essais, nous avons choisi de travailler avec un volume de 700 g pour le mortier de référence.

A partir de ce mortier de base, nous avons ajouté des proportions variables de 0, 10, 20 et 30% de chaque addition minérale (fillers calcaires, pouzzolane, poudre de marbre). Les deux types de superplastifiants sont utilisés avec des dosages de 0 ; 0.8 ; 1 et 1,2% du poids du ciment pour déffloculer les grains du liant et faciliter la dispersion. Les mesures au mini-cône et au rhéomètre sont effectuées immédiatement après le malaxage. Les tableaux 3.6 et 3.7 donnent les compositions des différents mortiers selon le type de superplastifiant utilisée.

Tableau 3.6. Les compositions des différents mortiers avec le superplastifiant à base d'éther polycarboxylique.

N	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (ml)	Type d'additions	% d'additions	Types de superplastifiant	% de superplastifiant
1	700	2100	385	/	/	SP1	0,8
2	700	2100	385	/	/	SP1	1
3	700	2100	385	/	/	SP1	1,2
4	700	2100	385	Pouzzolane	10	/	/
5	700	2100	385	Pouzzolane	20	/	/
6	700	2100	385	Pouzzolane	30	/	/
7	700	2100	385	Fillers	10	/	/
8	700	2100	385	Fillers	20	/	/
9	700	2100	385	Fillers	30	/	/
10	700	2100	385	Marbre	10	/	/
11	700	2100	385	Marbre	20	/	/
12	700	2100	385	Marbre	30	/	/
13	700	2100	385	Fillers	10	SP1	0,8
14	700	2100	385	Fillers	10	SP1	1
15	700	2100	385	Fillers	10	SP1	1,2
16	700	2100	385	Fillers	20	SP1	0,8
17	700	2100	385	Fillers	20	SP1	1
18	700	2100	385	Fillers	20	SP1	1,2
19	700	2100	385	Fillers	30	SP1	0,8
20	700	2100	385	Fillers	30	SP1	1
21	700	2100	385	Fillers	30	SP1	1,2
22	700	2100	385	Pouzzolane	10	SP1	0,8
23	700	2100	385	Pouzzolane	10	SP1	1
24	700	2100	385	Pouzzolane	10	SP1	1,2
25	700	2100	385	Pouzzolane	20	SP1	0,8
26	700	2100	385	Pouzzolane	20	SP1	1
27	700	2100	385	Pouzzolane	20	SP1	1,2
28	700	2100	385	Pouzzolane	30	SP1	0,8
29	700	2100	385	Pouzzolane	30	SP1	1
30	700	2100	385	Pouzzolane	30	SP1	1,2
31	700	2100	385	Marbre	10	SP1	0,8
32	700	2100	385	Marbre	10	SP1	1
33	700	2100	385	Marbre	10	SP1	1,2
34	700	2100	385	Marbre	20	SP1	0,8
35	700	2100	385	Marbre	20	SP1	1
36	700	2100	385	Marbre	20	SP1	1,2
37	700	2100	385	Marbre	30	SP1	0,8
38	700	2100	385	Marbre	30	SP1	1
39	700	2100	385	Marbre	30	SP1	1,2
40	700	2100	385	/	/	/	/

Tableau 3.7. Les compositions des différents mortiers avec superplastifiant à base de polycarboxylate.

N	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (ml)	Type d'additions	% d'additions	Types de superplastifiant	% de superplastifiant
1	700	2100	385	/	/	SP2	0,8
2	700	2100	385	/	/	SP2	1
3	700	2100	385	/	/	SP2	1,2
4	700	2100	385	Pouzzolane	10	/	/
5	700	2100	385	Pouzzolane	20	/	/
6	700	2100	385	Pouzzolane	30	/	/
7	700	2100	385	Fillers	10	/	/
8	700	2100	385	Fillers	20	/	/
9	700	2100	385	Fillers	30	/	/
10	700	2100	385	Marbre	10	/	/
11	700	2100	385	Marbre	20	/	/
12	700	2100	385	Marbre	30	/	/
13	700	2100	385	Fillers	10	SP2	0,8
14	700	2100	385	Fillers	10	SP2	1
15	700	2100	385	Fillers	10	SP2	1,2
16	700	2100	385	Fillers	20	SP2	0,8
17	700	2100	385	Fillers	20	SP2	1
18	700	2100	385	Fillers	20	SP2	1,2
19	700	2100	385	Fillers	30	SP2	0,8
20	700	2100	385	Fillers	30	SP2	1
21	700	2100	385	Fillers	30	SP2	1,2
22	700	2100	385	Pouzzolane	10	SP2	0,8
23	700	2100	385	Pouzzolane	10	SP2	1
24	700	2100	385	Pouzzolane	10	SP2	1,2
25	700	2100	385	Pouzzolane	20	SP2	0,8
26	700	2100	385	Pouzzolane	20	SP2	1
27	700	2100	385	Pouzzolane	20	SP2	1,2
28	700	2100	385	Pouzzolane	30	SP2	0,8
29	700	2100	385	Pouzzolane	30	SP2	1
30	700	2100	385	Pouzzolane	30	SP2	1,2
31	700	2100	385	Marbre	10	SP2	0,8
32	700	2100	385	Marbre	10	SP2	1
33	700	2100	385	Marbre	10	SP2	1,2
34	700	2100	385	Marbre	20	SP2	0,8
35	700	2100	385	Marbre	20	SP2	1
36	700	2100	385	Marbre	20	SP2	1,2
37	700	2100	385	Marbre	30	SP2	0,8
38	700	2100	385	Marbre	30	SP2	1
39	700	2100	385	Marbre	30	SP2	1,2
40	700	2100	385	/	/	/	/

III. Démarches méthodologiques :

III.1. Essai du mini cône :

Le mini-cône présente des dimensions qui sont déduites de celles du cône d'Abrams par un rapport homothétique de deux. Il présente un diamètre supérieur de 50 mm et inférieur de 100 mm avec une hauteur de 150 mm.

Initialement conçu pour les MBE, le mini cône permet d'évaluer la fluidité des mortiers en mesurant soit leur affaissement soit leur étalement.

Le cône est placé au centre d'une plaque en verre puis rempli avec du mortier directement récupéré du malaxeur. Une fois rempli, le cône est soulevé lentement pour procéder à la mesure d'affaissement ou de l'étalement. Dans ce dernier cas, l'étalement est considéré comme la moyenne entre deux mesures de diamètres perpendiculaires.



Figure 3.2. Illustration du mini cône.

III.2. Essai au rhéomètre :

L'étude des paramètres rhéologiques a été faite à l'aide d'un agitateur à vanne de type Heidolph (figure 3.3). Ce type de rhéomètre couette est généralement considéré comme étant le mieux adapté pour des suspensions cimentaires possédant un seuil de cisaillement (Adjoudj, 2015).



Figure 3.3. Dispositif de l'essai rhéologique.

Le principe consiste à mettre en rotation à différentes vitesses un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de mortier frais et de mesurer le couple appliqué. Il est préférable d'utiliser une pale afin d'éviter des perturbations lors de la mise en place de cette dernière, ce qui est aussi un avantage pour les matériaux thixotropes comme les matériaux cimentaires (Koehler et col, 2006).

Après avoir mesuré l'affaissement, on remplit le récipient spécifique aux mortiers qui est caractérisé par un diamètre de 50mm et une hauteur de 130 mm. Une fois le récipient fixé, on place la pale de diamètre 25mm et de hauteur de 100 mm au centre de l'échantillon.



Figure 3.4. Illustration de la pale et du récipient du rhéomètre.

Cependant il faut s'assurer que l'extrémité supérieur du croisillon se situe à l'arase du mortier.

Chaque seconde, un logiciel de pilotage « Watch and control » permet la capture du couple exercé selon la vitesse de rotation appliquée (Ω).

Le profil de vitesse adopté (figure 3.6) a été choisi sur la base des travaux de [Soualhi et col ,2014]. Ce profil permet d'avoir des mesures plus stables tout en minimisant le phénomène de ségrégation. Il est évident que le profil choisi doit comporter suffisamment de points afin de bien caractériser le comportement rhéologique du mortier.

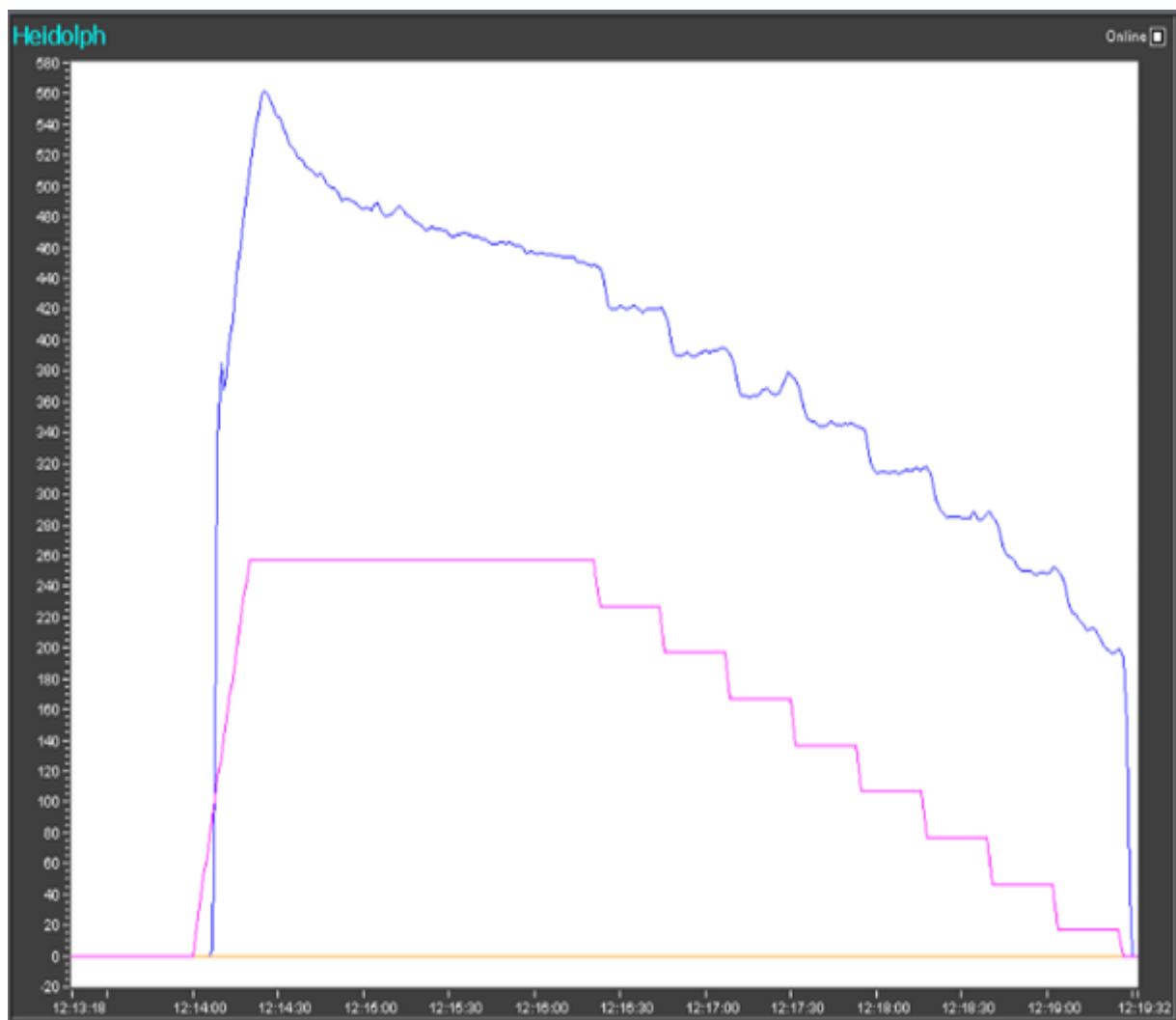
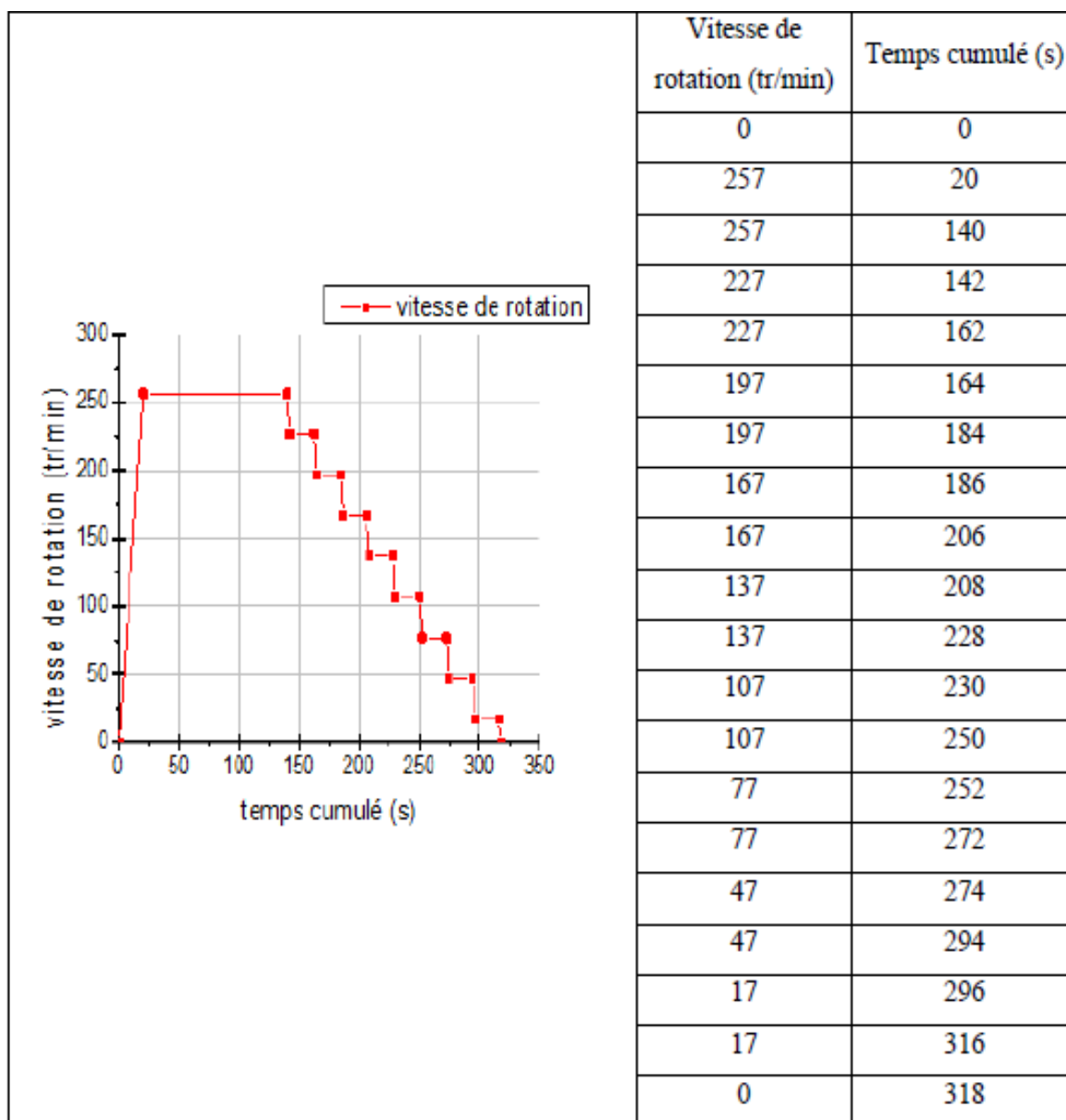


Figure 3.5. Evolution du couple et la vitesse de rotation en fonction du temps

Tableau 3.8. Profil de vitesse adopté pour les essais rhéologiques sur mortier.



Dans un premier temps, le mortier est pré-cisailé pendant deux minutes à la vitesse maximale assurée par l'appareil selon la consistance du mélange et qui représente 257tr/min pour les mortiers. Ce pré-cisaillement sert pour s'affranchir du phénomène de thixotropie. Par la suite, un profil de vitesse descendant est utilisé. Pour chaque palier de vitesse, le couple de rotation (M) correspondant est la moyenne des dix dernières mesures c'est-à-dire lorsqu'il devient stable et reflète un régime.

III.3. Différentes étapes d'un essai rhéologique :

Le déroulement de l'essai passe par les étapes suivantes :

Première étape :

Avant la réalisation des essais, il est nécessaire de mettre en marche l'appareil pendant environ 20 minutes à la vitesse maximale 400 tr/min.

Deuxième étape :

Mesurer les couples à vide (M_{vide}) correspondant aux vitesses imposées.

Troisième étape :

Remplir le mortier jusqu'à l'arase du récipient et piquer 15 fois en deux couches avec une tige ; mettre en place et centrer le croisillon de sorte que l'extrémité supérieure des ailes se situe à l'arase du récipient ; mesurer ensuite les couples totaux correspondant en fonction des vitesses imposées (M_{total}).

Quatrième étape :

Exploiter les couples (M) en fonction des vitesses imposées

Les couples (M) sont obtenus en faisant la différence entre M_{total} et M_{vide} .

Le résultat brut de l'essai réalisé se présente sous la forme suivante :

$$M = M_0 + k. \Omega \quad (3.1)$$

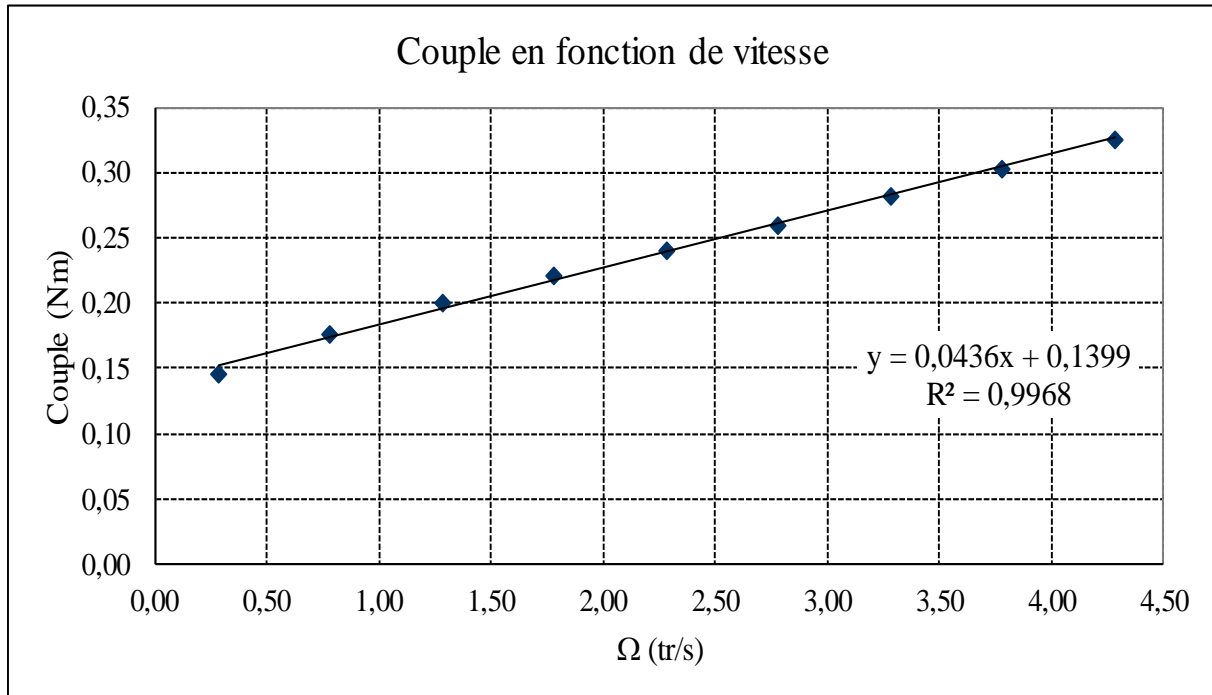


Figure 3.6. Evaluation du couple en fonction de la vitesse

Cinquième étape :

Transformer les relations ($M - \Omega$) en relations ($\tau - \dot{\gamma}$) afin d'en déduire le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité (μ).

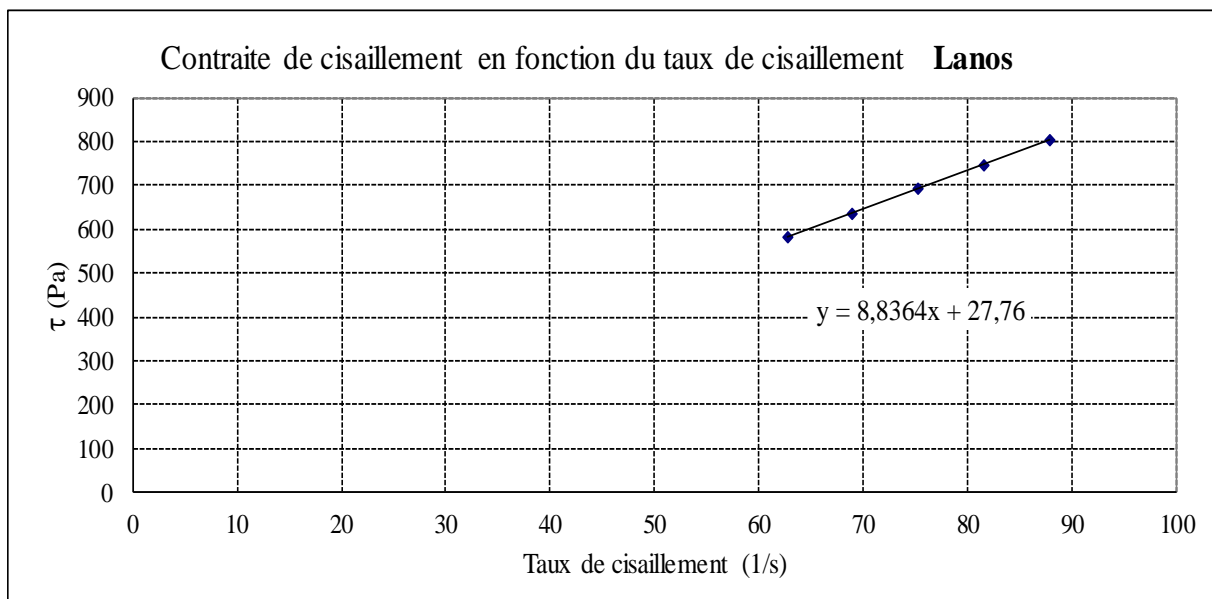


Figure 3.7. Evaluation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

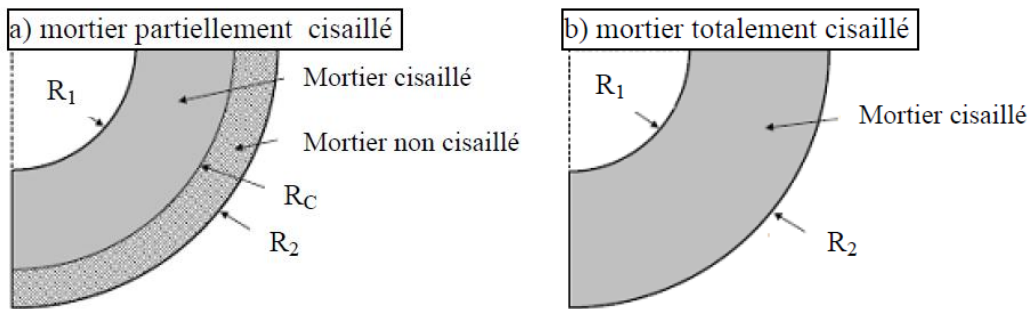
III.4. Mesure des paramètres rhéologiques :

La démarche développée par Estellé et Lanos ,2009 est utilisée pour l'exploitation des résultats et la détermination des paramètres rhéologiques recherchés à partir des résultats bruts fournis par l'appareil. Les équations suivantes expriment respectivement la vitesse de cisaillement lorsque le fluide est partiellement cisailé et complètement cisailé respectivement dans l'entrefer.

$$\dot{\gamma} = 2M \frac{d\Omega}{dM} \quad (3.2)$$

$$\dot{\gamma} = 2 \cdot \frac{M \cdot \frac{d\Omega}{dM}}{\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right)} - \frac{\Omega - M \cdot \frac{d\Omega}{dM}}{\ln\left(\frac{R_b}{R_c}\right)} \quad (3.3)$$

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



Le taux de cisaillement engendré par une vitesse de rotation Ω_i peut être déterminé par la formule suivante :

$$\dot{\gamma} = \max(\dot{\gamma}_j ; \dot{\gamma}_j) \quad (3.4)$$

Avec :

$$\frac{d\Omega_j}{dM_j} \cong \frac{\Omega_{j+1} - \Omega_{j-1}}{M_{j+1} - M_{j-1}} ; \quad i = j \text{ et } j = 1 .. n \quad (3.5)$$

Ainsi la contrainte correspondante à la vitesse de rotation Ω_i s'obtient selon les équations :

$$\tau_i = \frac{1}{2} (\tau_{j-1} + \tau_{j+1}) \quad (3.6)$$

Avec

$$\tau_j(M) = \frac{M_j}{2\pi h R_b^2} \quad (3.7)$$

Les équations (3.4) et (3.7) permettent de passer du couple ($M_i - \Omega_i$) au couple ($\tau_i, \dot{\gamma}_i$) et de déterminer les paramètres rhéologiques du béton testé.

IV. Essai de la résistance mécanique :

IV.1. Confection des éprouvettes prismatiques :

Des éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm³ de mortiers sont confectionnées et maturées dans l'eau pendant 28 jours pour les essais mécaniques de compression et de traction par flexion.

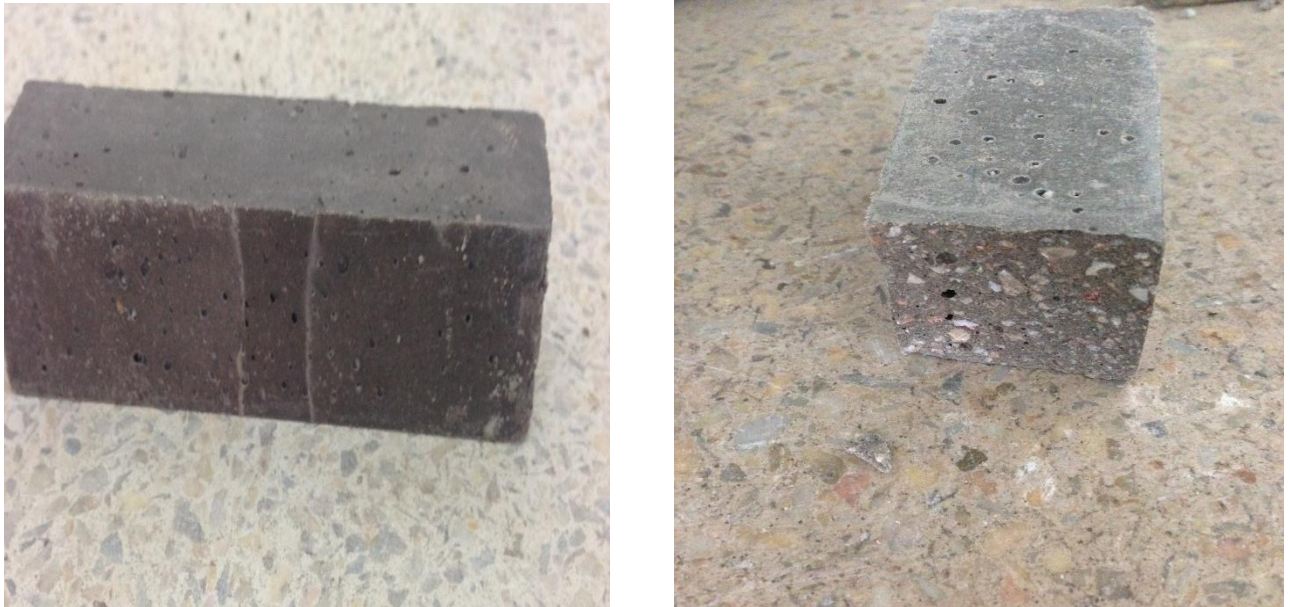


Figure 3.8 .Eprouvettes prismatiques des mortiers.

IV.2. Essais de compression et de traction par flexion :

Les résistances à la compression des mortiers ont été mesurées à 28 jours à l'aide du banc d'essai appelé « didactique » équipé d'une presse permettant d'exercer des charges allant jusqu'à 160 KN avec une vitesse constante de 1KN/s (figure 3.9). La contrainte de résistance considérée pour chaque type de mortier est donnée par la formule (3.8) et déduite de la moyenne de trois essais d'écrasement.

$$R_C = \frac{F}{d^2} \quad (3.8)$$

Où :

R_C : Est la résistance en compression, en Méga Pascals (Newtons par millimètre carré) ;

F : Est la charge maximale, en Newtons ;

d : Est la dimension de la section transversale de l'éprouvette, en millimètres.



Figure 3.9. Dispositif d'essais d'écrasement.

Les résistances à la traction par flexion des mortiers ont aussi été évaluées à 28 jours avec le même banc d'essai en appliquant des charges allant jusqu'à 10 KN avec une vitesse constante de 0,5 KN/s. Le dispositif de flexion 3 points adapté à l'appareillage est présenté sur la figure 3.10.

$$R_t = \frac{3FL}{2d^3} \quad (3.9)$$

Où :

R_t : Est la résistance en flexion, en Méga Pascals (Newtons par millimètre carré) ;

F : Est la charge maximale, en Newtons ;

l : Est l'écartement entre les deux rouleaux d'appui, en millimètres ;

d : Est la dimension de la section transversale de l'éprouvette, en millimètres.



Figure 3.10. Dispositif de flexion 3 points.

Références bibliographiques

- Lanos, C. Estellé, P. "Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais", European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol 13(4), 2009, pp. 457-471
- Koehler, E. Fowler, D.Ferraris, C. Amziane, S."New portable rheometer for fresh self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, vol 233,2006,pp.97-116.
- Adjoudj, M. " Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton ". Thèse de doctorat, soutenue en 2015, Université Cergy Pontoise, France, Hassiba Benbouali, Algérie. 161p.

Chapitre VI



Résultats et discussions

Résumé

L'intégration des additions minérales dans les mélanges cimentaires entraîne une modification de la distribution granulaire. Cependant, ces additions peuvent augmenter le taux de floculation au niveau de la pâte à cause des réactions de Van der Waals. L'utilisation des superplastifiants devient donc indispensable pour remédier à ce problème et améliorer l'ouvrabilité des mélanges. Ces modifications des propriétés physico-chimiques des composants du béton, dues à des additions minérales et organiques, affectent directement les propriétés rhéologiques et mécaniques des mélanges cimentaires. Ce chapitre regroupe les résultats et les interprétations relatives à l'influence des additions minérales et organique sur les mortiers.

Sommaire du chapitre 4

I.	Les essais d'affaissement	67
II.	LE seuil de cisaillement	72
III.	La viscosité plastique	75
IV.	La résistance.....	78
V.	Les références du chapitre 4.	83
	Référence bibliographiques.	84

I. Les essais d'affaissement :

I.1. Combinaison Fillers calcaires/éther poly carboxylique, polycarboxylate :

Les fillers calcaires diminuent la fluidité car ils absorbent une quantité d'eau responsable de la fluidité du mélange.



Figure 4.1 : Représentation de l'affaissement d'un mortier préparé avec des fillers calcaires (Sans adjuvant).

Les essais d'affaissement ont montré que les deux superplastifiants choisis pour notre étude sont très compatibles avec les fillers calcaires et permettent d'améliorer la fluidité des mélanges.

Par ailleurs, l'effet du superplastifiant à base de polycarboxylate est nettement meilleure car il a permis d'avoir des mortiers qui s'étalent avec des affaissements qui sont quatre fois supérieures que ceux des mortiers confectionnés avec l'éther polycarboxylate figures (4.2, 4.3 et 4.4).

Nous avons aussi remarqué qu'une combinaison de 1% du superplastifiant à base de polycarboxylate et 10% des fillers aboutit à un mortier autoplaçant où l'étalement est supérieure à 22 cm. Au delà d'un taux de 10% de fillers calcaires, l'effet du superplastifiant devient moins significatif.



Figure 4.2 : Etalement des mortiers avec filler

(a) combiné à l'éther Poly carboxylique (b) combiné au polycarboxylate

Les figures (4.3 et 4.4) présentent des surfaces de réponse de l'affaissement en fonction des taux des fillers calcaires combinés à des éthers poly carboxyliques et à des polycarboxylates.

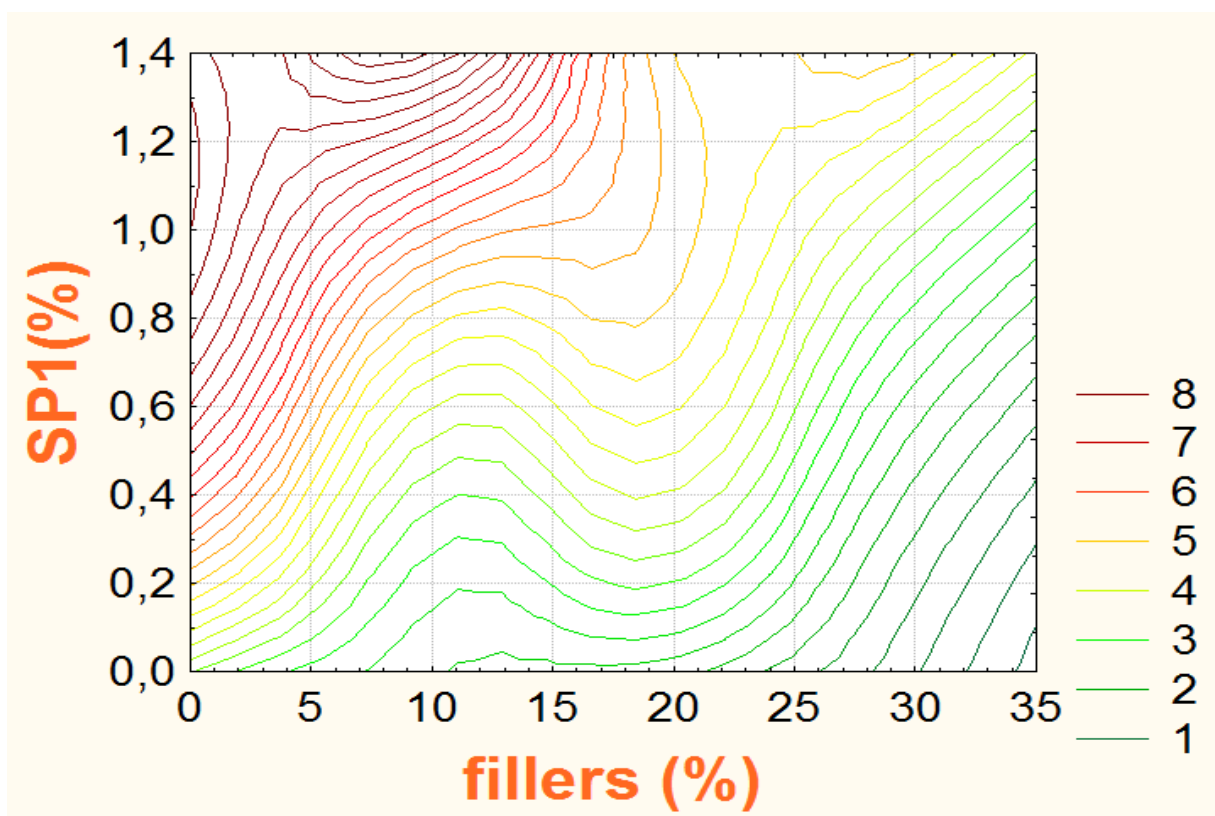


Figure 4.3 : Variation de l'affaissement en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants à base d'éther poly carboxylique

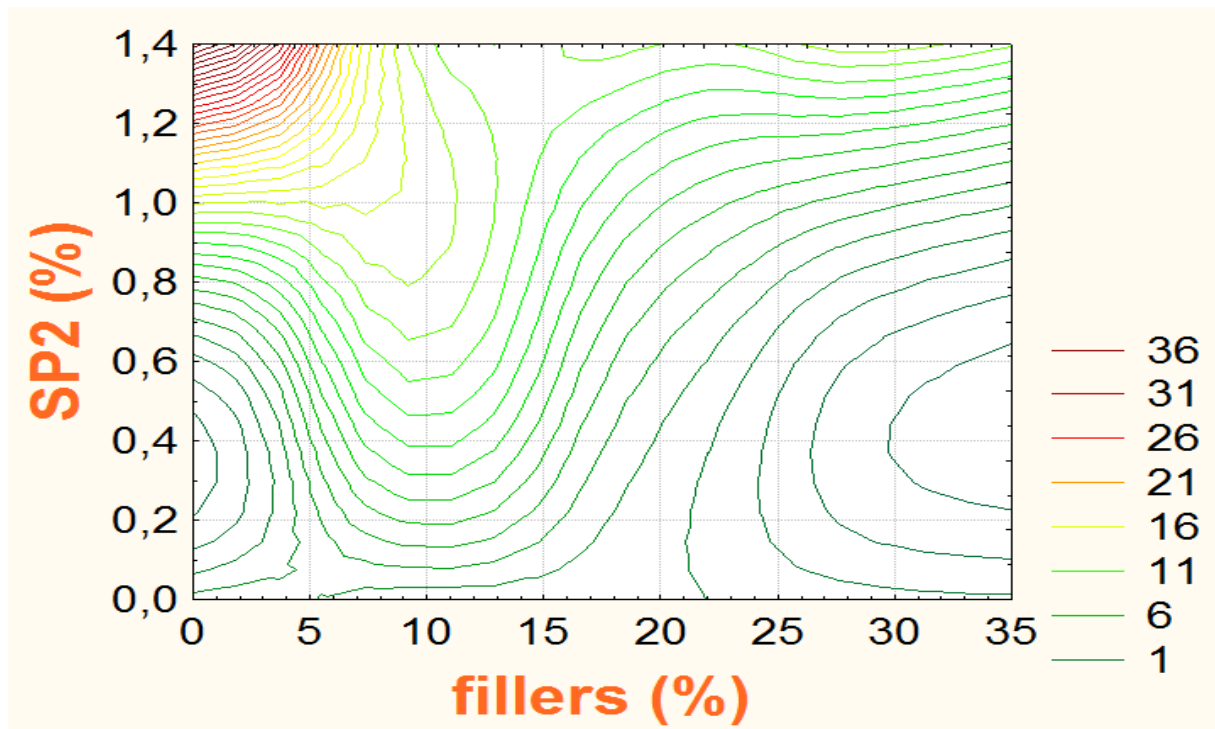


Figure 4.4: Variation de l'affaissement en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants à base de polycarboxylate

I.2. Combinaison pouzzolane / Ether poly carboxylique, polycarboxylate :

Presque les mêmes tendances obtenues précédemment ont été aussi constatées sur les mélanges à base de pouzzolane combinée avec les superplastifiants.

Cependant, les fillers calcaires ont été plus efficaces sur le plan de la fluidité, pratiquement tous les mortiers avec les fillers calcaires ont des affaissements supérieurs que ceux avec de la pouzzolane.



Figure 4.5: Mortier avec fillers



Figure 4.6 : Mortier avec pouzzolane

Les figures (4.7 et 4.8) présentent des surfaces de réponse de l'affaissement en fonction des taux de la pouzzolane combinée à des éthers poly carboxyliques et à des polycarboxylates respectivement.

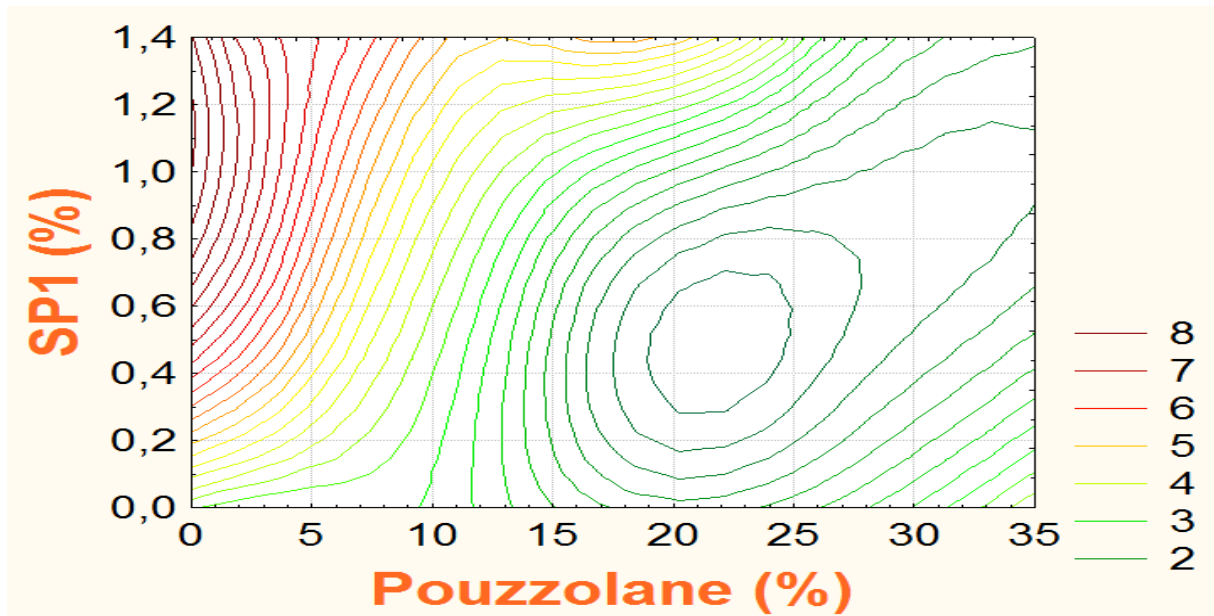


Figure 4.7 : Variation de l'affaissement en fonction des taux de la pouzzolane et des superplastifiants à base d'éther poly carboxylique

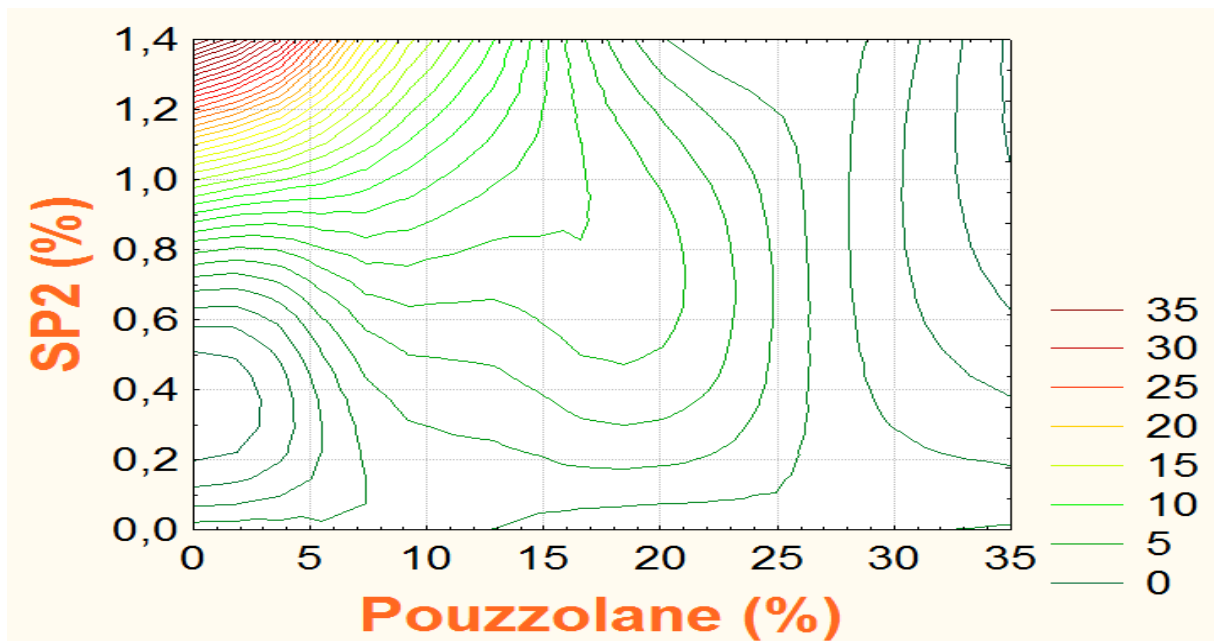


Figure 4.8 : Variation de l'affaissement en fonction des taux de pouzzolane et des superplastifiants à base de polycarboxylate

I.3. Combinaison Poudre de Marbre / éther poly carboxylique, polycarboxylate :

Les figures (4.9, 4.10) montrent que la poudre de marbre a permis d'améliorer la fluidité des mélanges. Les additions organiques à base de polycarboxylate ont encore une fois confirmé leur efficacité. Les figures 4.9 et 4.10 présentent les surfaces de réponse de l'affaissement en fonction des taux de la poudre de marbre combinée à des éthers poly carboxyliques et à des polycarboxylates respectivement.

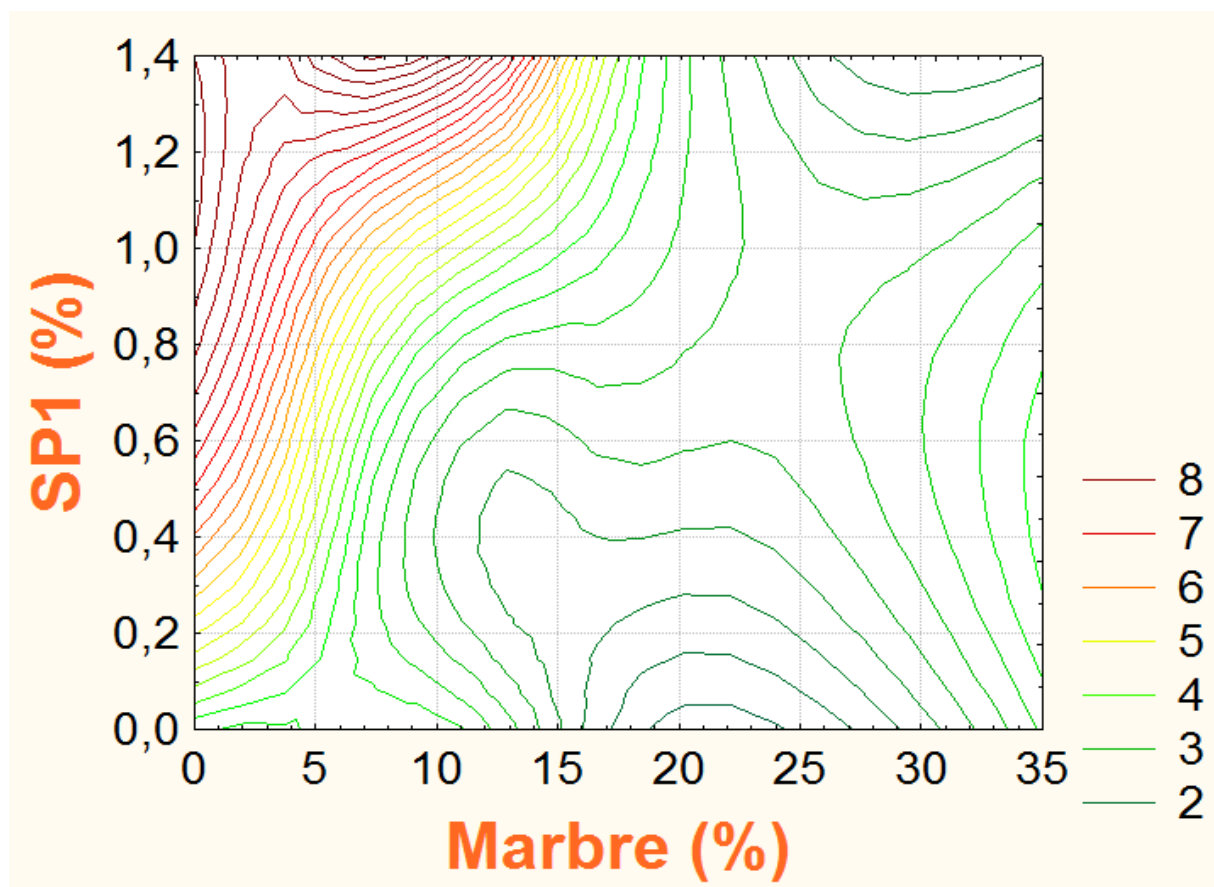


Figure 4.9 : Variation de l'affaissement en fonction des taux de la poudre de marbre et des superplastifiants à base d'éther poly carboxylique

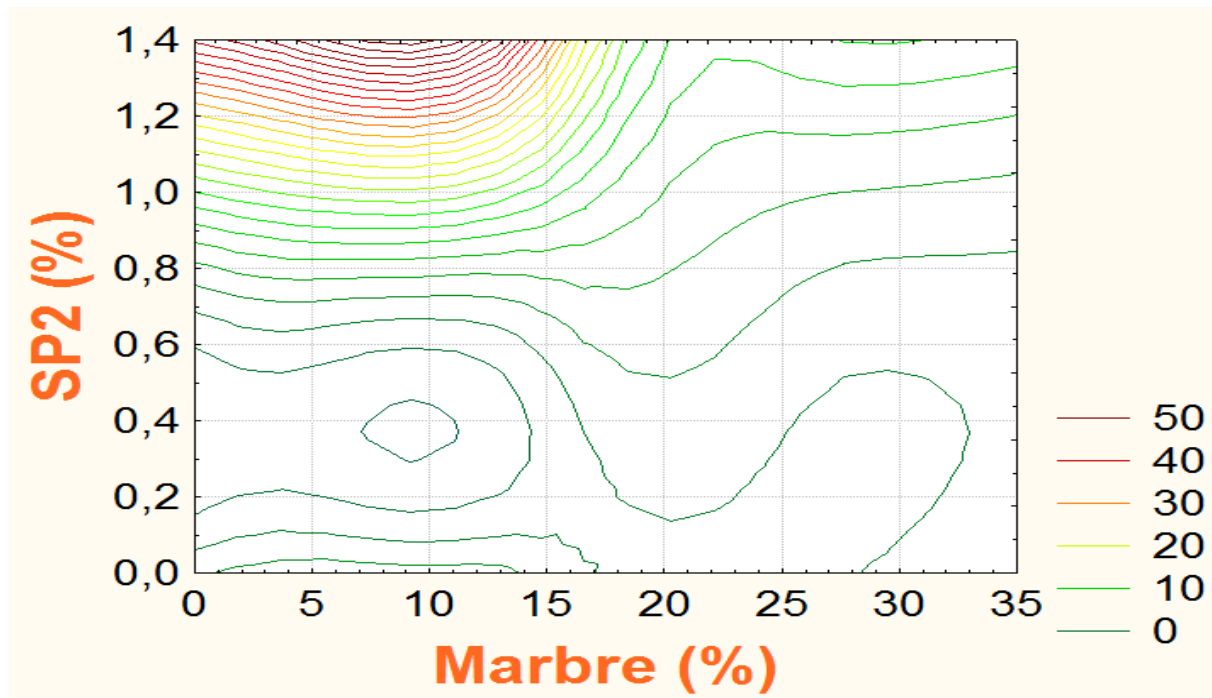


Figure 4.10 : Variation de l'affaissement en fonction des taux de la poudre de marbre et des superplastifiants à base de polycarboxylate

II. Le seuil de cisaillement :

II.1. Combinaison : Fillers calcaires /Ether poly carboxylique, poly carboxylates :

Le travail expérimental relatif à l'influence des additions organiques sur le seuil de cisaillement figure (4.11) a permis de confirmer les résultats de la littérature. Nos résultats rejoignent ceux de [Wallevik, 2011] qui aboutissent à la conclusion que les superplastifiants réduisent le seuil de cisaillement. Par ailleurs, l'utilisation des additions minérales ont plus tendance à augmenter le seuil de cisaillement.

En effet, les additions minérales en général et les fillers calcaires en particulier caractérisées par un coefficient d'adsorption important sont responsables de la diminution d'eau dans les mélanges ce qui a pour effet d'accroître le seuil de cisaillement, ce résultat confirme les conclusions de plusieurs études [Adjoudj, 2013].

Le superplastifiant à base de polycarboxylates est plus efficace pour réduire le seuil de cisaillement et semble avoir une meilleur compatibilité avec les fillers calcaires (figure 4.11).

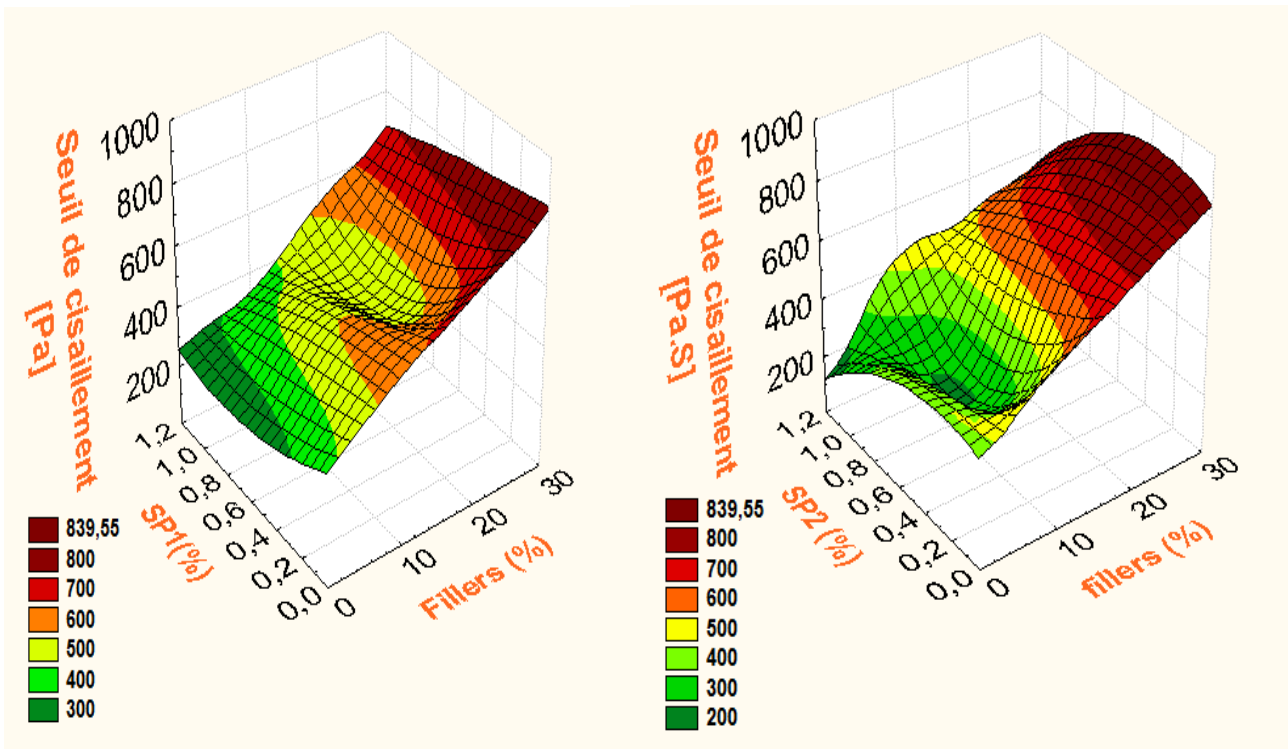


Figure 4.11 : Variation du seuil de cisaillement en fonction des fillers calcaires et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate

II.2. Combinaison pouzzolane naturelle/Ether poly carboxylique, polycarboxylate

A partir de la figure(IV.12), il est clair que l'augmentation de la teneur en pouzzolane augmente le seuil de cisaillement pour les mortiers adjuvantés et non adjuvantés. Par ailleurs, en combinaison avec la pouzzolane, il semble que le superplastifiant à base de polycarboxylate amène à des seuils de cisaillement plus élevés par rapport à un superplastifiant à base d'éther poly carboxylique.

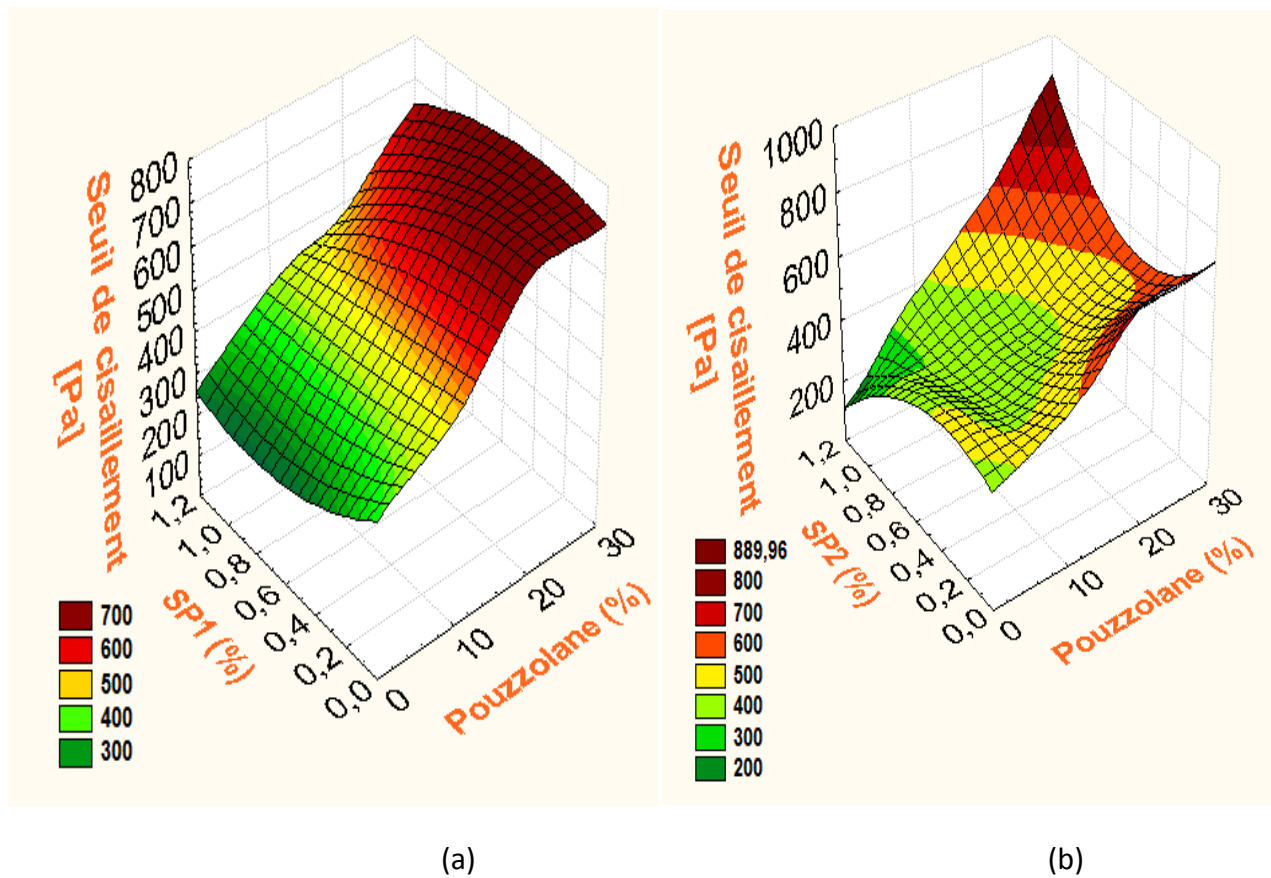


Figure IV.12 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la pouzzolane et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate

II.3. Combinaison Poudre de Marbre/ Ether poly carboxylique, polycarboxylate

Dans cette configuration, le superplastifiant à base de poly carboxylates est plus efficace pour réduire le seuil de cisaillement figure (4.13). Par ailleurs, il apparaît à partir des résultats trouvés que les seuils de cisaillement des mortiers avec poudre de marbre sont les plus faibles, ce qui est en adéquation avec les résultats d'affaissement figures (4.9, 4.10), et qui confirme une corrélation entre les seuils de cisaillement et les affaissements.

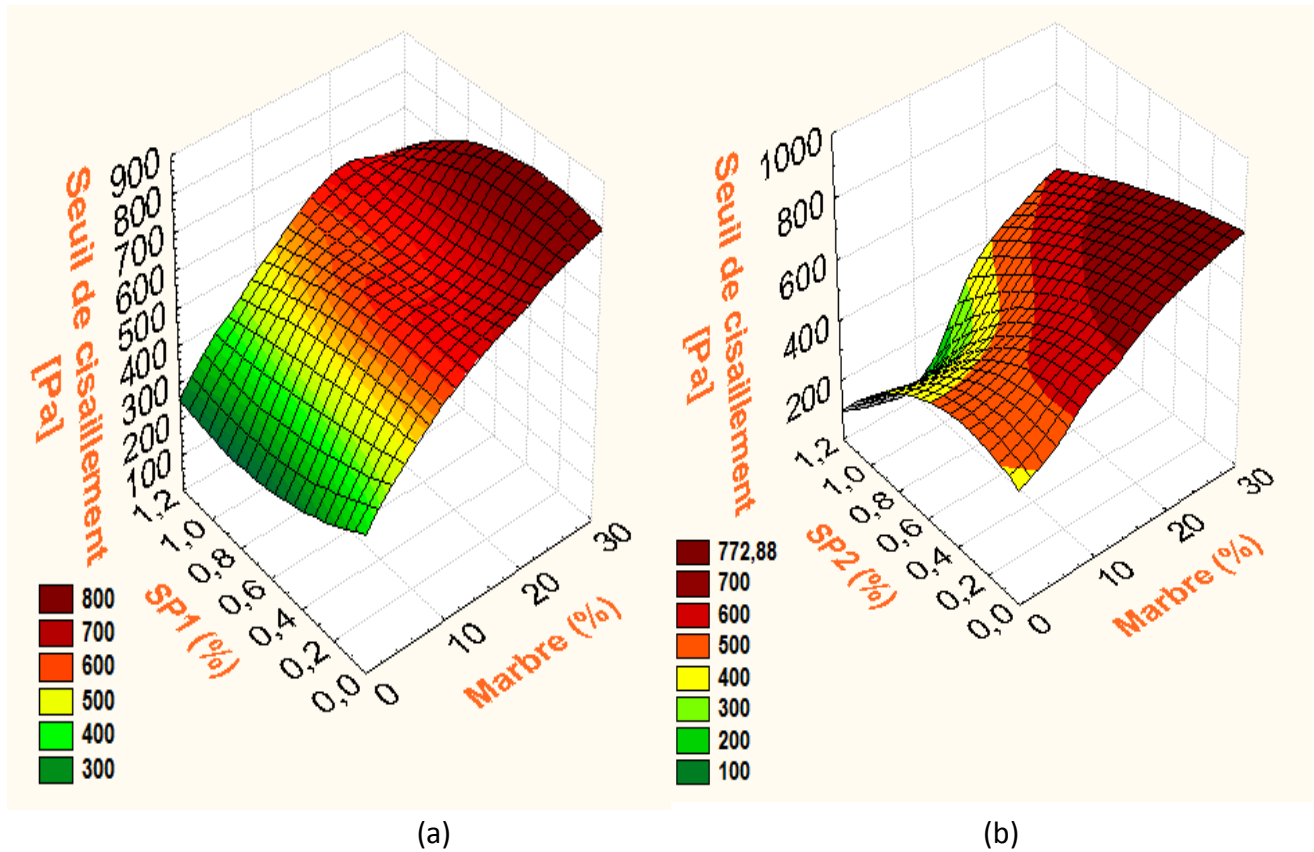


Figure 4.13 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la poudre de marbre et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate

III. La viscosité plastique :

III.1. Combinaison Fillers calcaires / Ether poly carboxylique, Poly carboxylate :

L'ajout des fillers calcaires augmente la viscosité des mélanges étudiés. Ce résultat est principalement dû à la croissance des frictions entre les particules du liant causé par l'ajout de ces additions minérales. Par ailleurs, les deux superplastifiants permettent de réduire la viscosité en assurant une meilleure défloculation des particules du liant à l'échelle de la pâte et qui permettent d'envelopper correctement les grains des granulats réduisant ainsi les frottements entre ces derniers (figure 4.14).

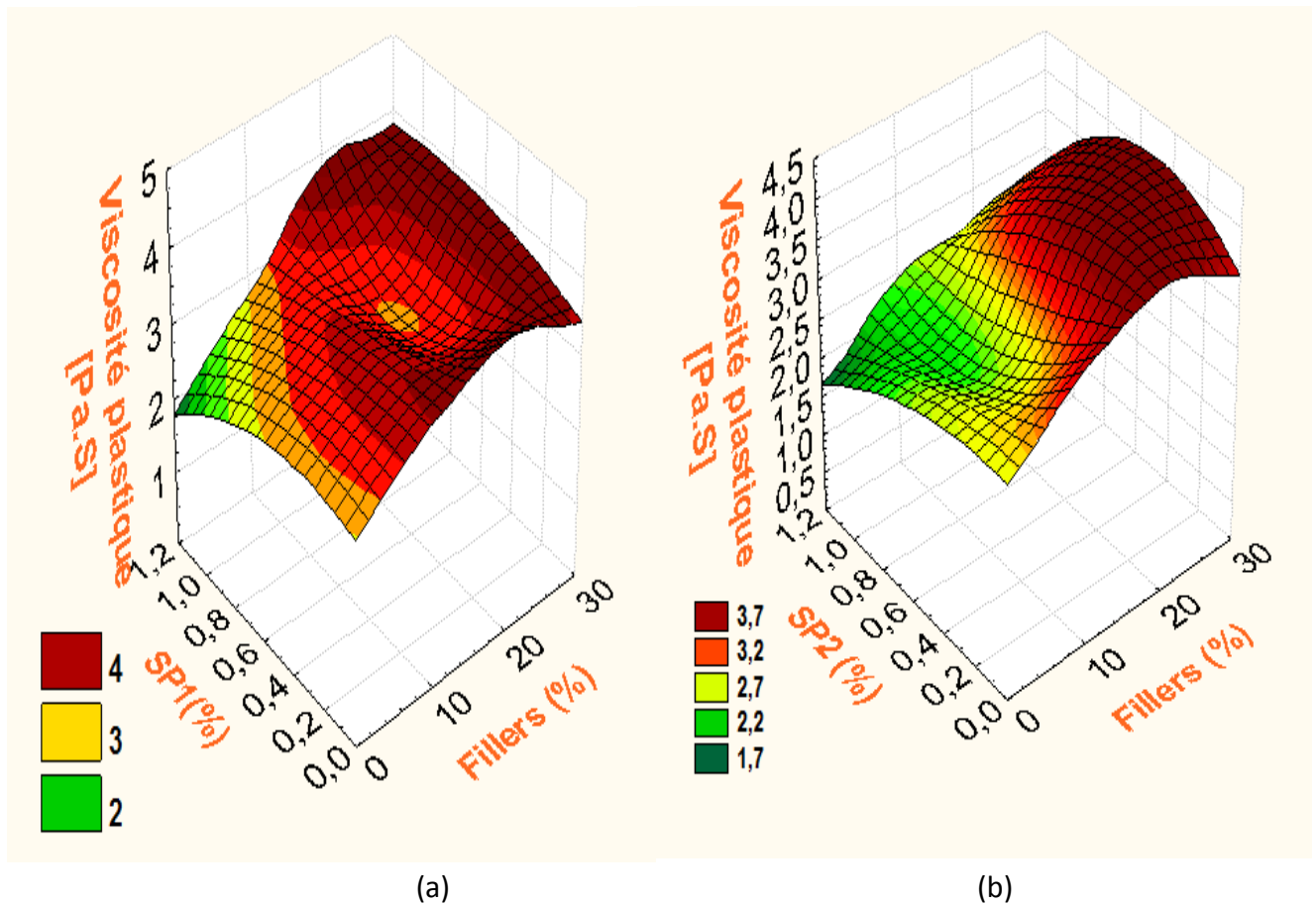
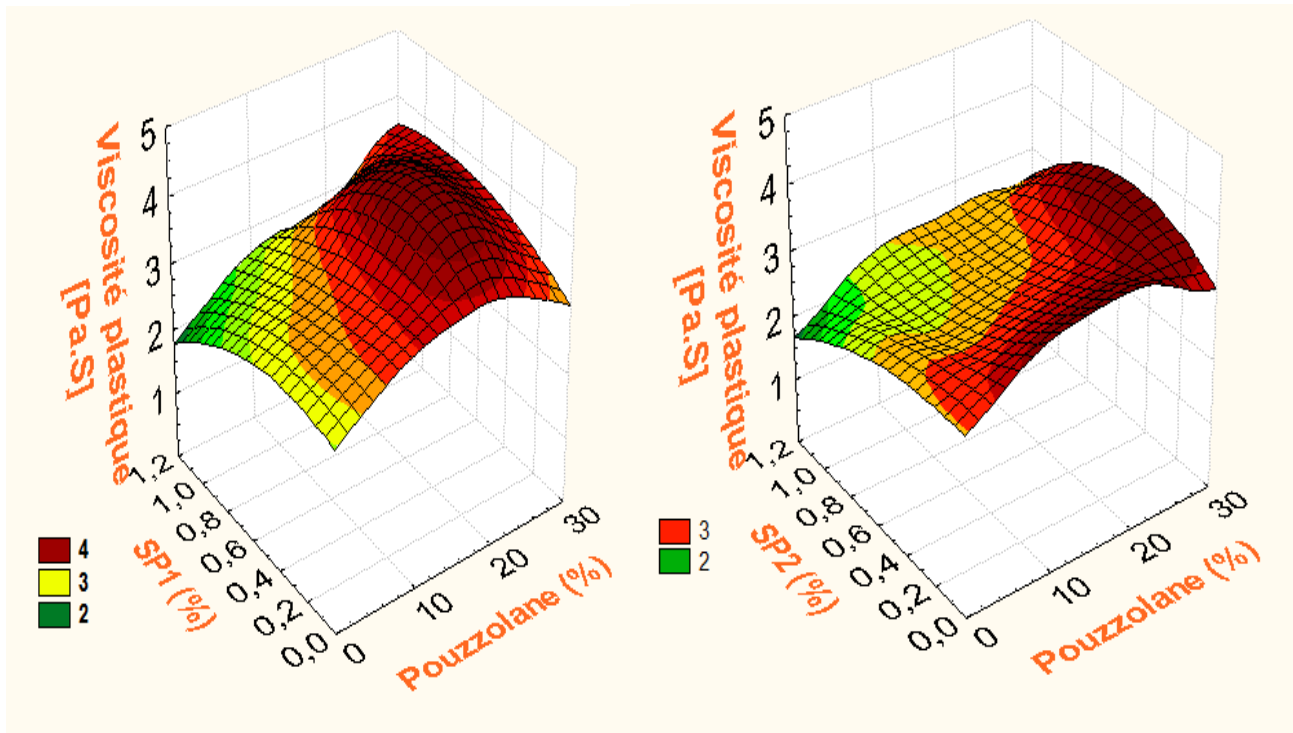


Figure 4.14 : Variation de la viscosité en fonction des fillers calcaires et des superplastifiants
(a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate

III.2. Combinaison Pouzzolane naturelle / Ether poly carboxylique, Poly carboxylate :

Le dépouillement des résultats illustrés sur la figure (4.15) montre que le superplastifiant à base de poly carboxylate est plus recommandé pour réduire la viscosité lorsqu'on utilise la pouzzolane. Le couple (pouzzolane/poly carboxylate) a donné des mortiers moins visqueux que les ceux avec des fillers calcaires associés à des poly carboxylates. Par contre, la pouzzolane combinée à l'éther poly carboxylate amène à des viscosités plus grandes par rapport à des mortiers à base de fillers calcaires combinés avec ce même adjuvant.



(a)

(b)

Figure 4.15 : Variation de la viscosité en fonction de la pouzzolane et des superplastifiants
(a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate

III.3. Combinaison Poudre de Marbre/Ether poly carboxylique, poly carboxylate :

Si les résultats illustrés sur la figure (4.16) sont presque similaires à ceux présentés précédemment, nous constatons que les viscosités deviennent plus élevées lorsque la poudre de marbre est employée avec le superplastifiant à base d'éther poly carboxylique. Cette combinaison reste recommandée pour remédier aux problèmes de ségrégation et de ressuage de certains mélanges ou encore pour élever les viscosités comme il est souvent recommandé dans le cas des bétons autoplacants.

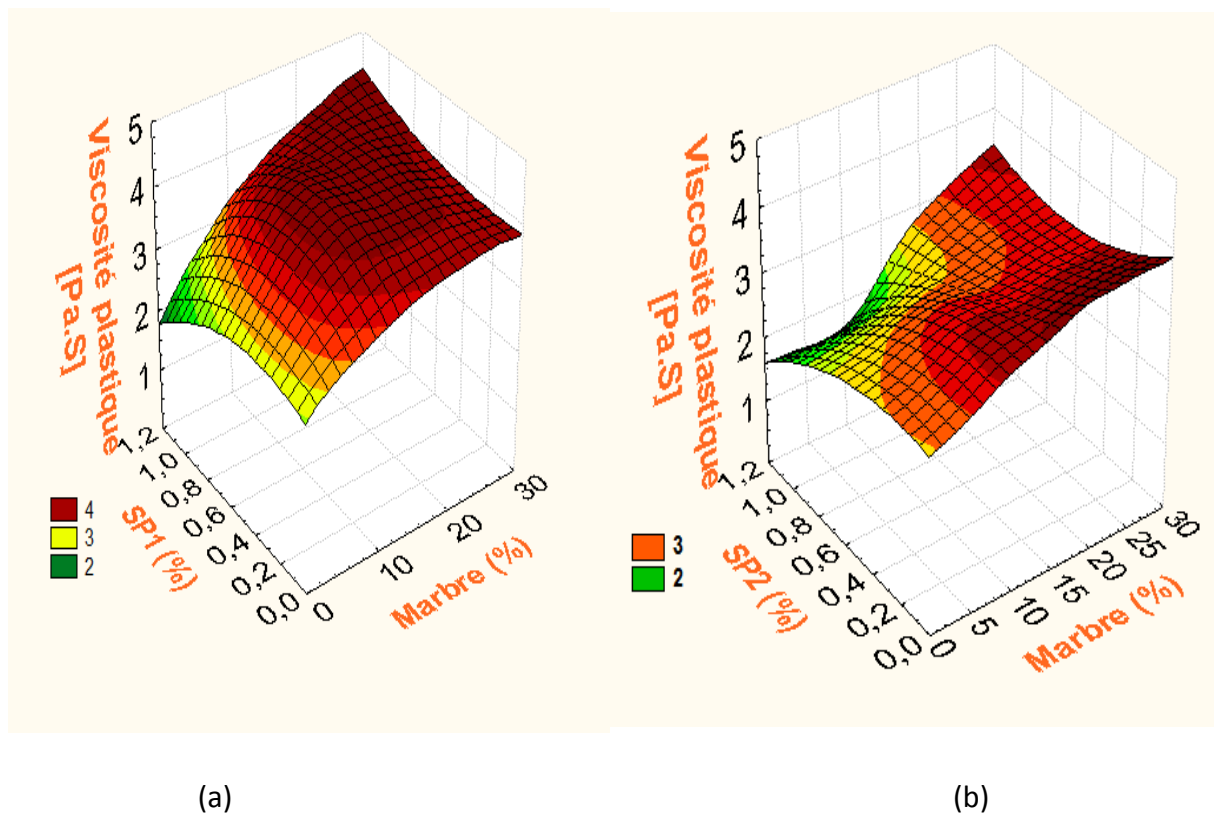


Figure 4.16 : Variation de la viscosité en fonction de la poudre de marbre et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate

Cependant, l'utilisation des polycarboxylates reste recommandée pour réduire la viscosité des mélanges sans trop se soucier des additions minérales utilisées.

IV. Les résistances :

IV.1. Combinaison Fillers calcaires / Ether poly carboxylique :

Pour les mortiers non adjuvés, Les résistances obtenus sont intéressantes car elles sont supérieures à 30 MPa, avec un optimum atteint lorsque la teneur de filler est de l'ordre de 15%. Ces résultats sont conformes à la littérature [Boukendakji et col, 2009].

Par contre, l'effet des superplastifiants à base d'éther poly carboxylique n'est pas significatif pour des mortiers sans substitution.

Nous avons constaté que la combinaison entre les fillers et le superplastifiant de type éther poly carboxylique a permis d'améliorer significativement la résistance, ce qui témoigne d'une bonne compatibilité entre l'éther poly carboxylique et les fillers calcaires (figure 4.17).

Les résultats obtenus sur les essais de traction par flexion confirment les résultats de la compression figure (4.18).

IV.2. Combinaison Fillers calcaires / polycarboxylate :

La combinaison entre les superplastifiants à base de polycarboxylate et les fillers permet d'améliorer légèrement les résistances par rapport à un superplastifiant de type éther carboxylique figure (4.17).

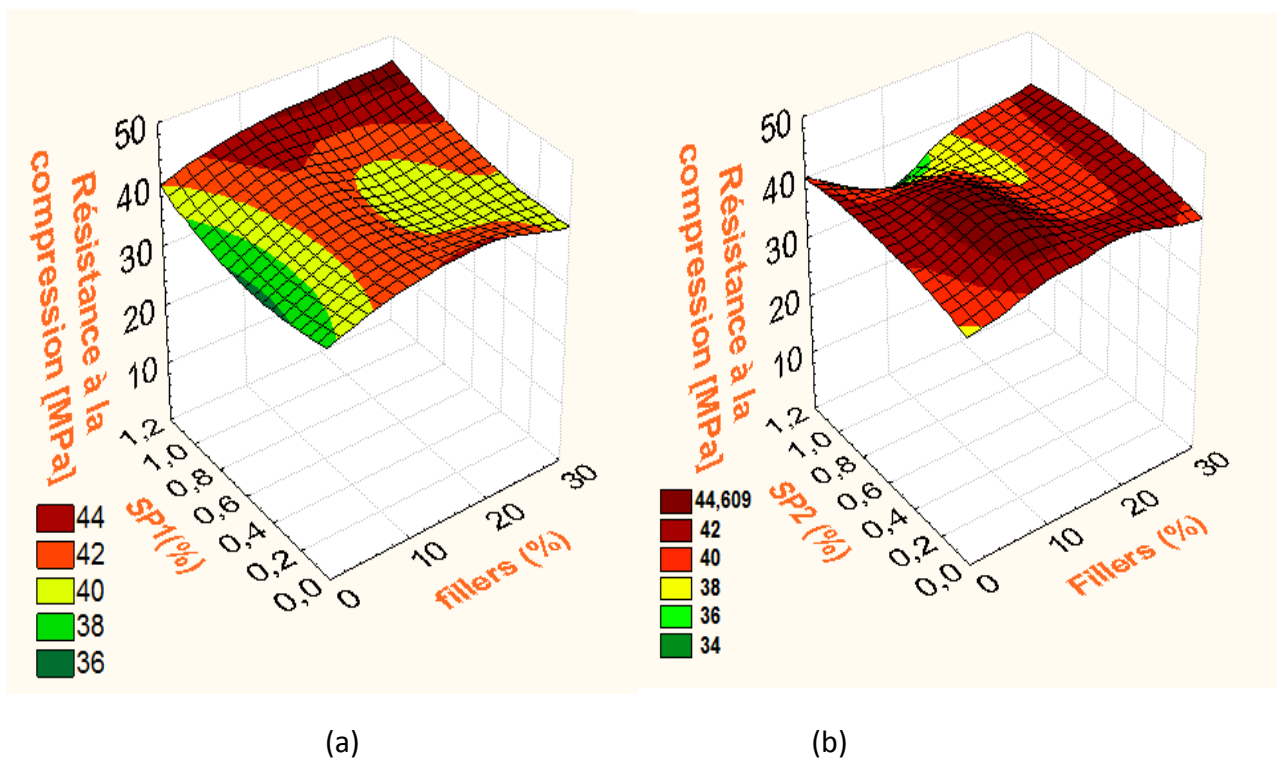
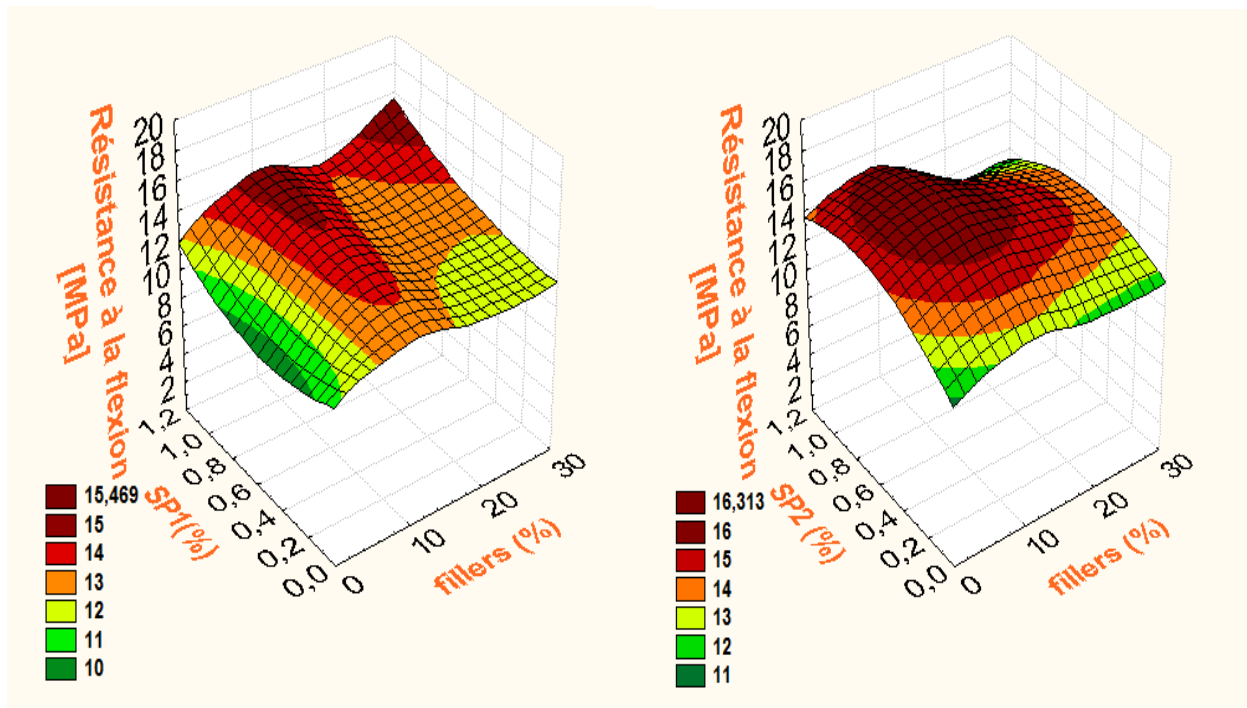


Figure 4.17 : la résistance a la compression en fonction des fillers et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate



(a)

(b)

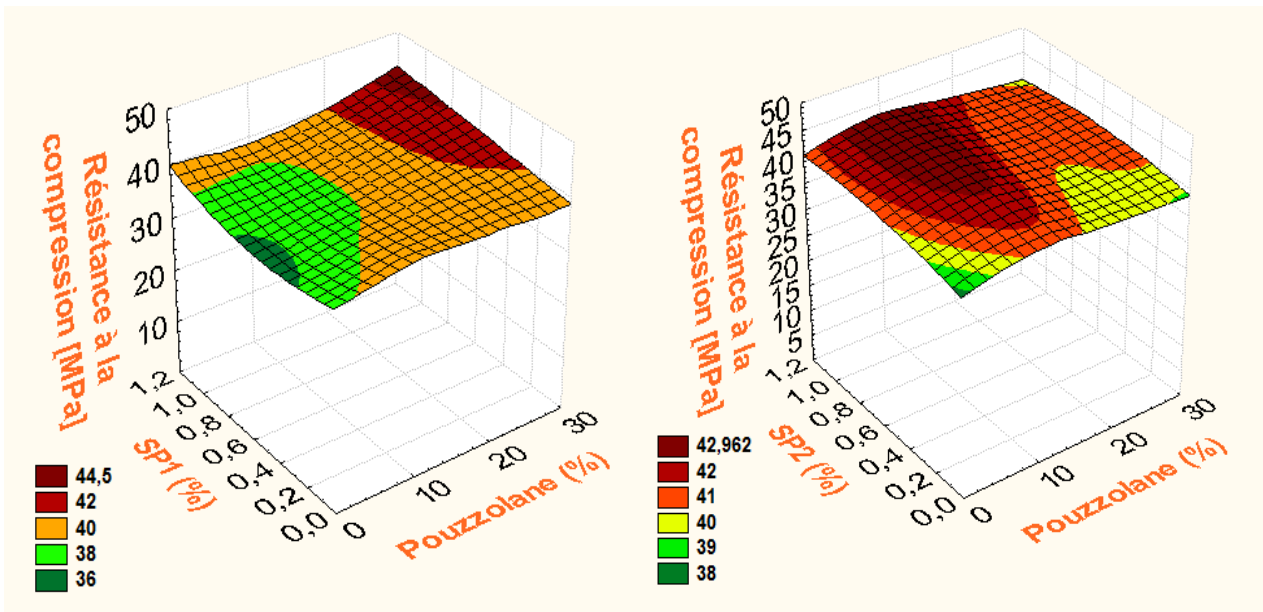
Figure 4.18 : la résistance a la flexion en fonction des fillers et des superplastifiants
 (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate

IV.3. Combinaison Pouzzolane naturelle / éther poly carboxylique :

Nous constatons qu'une teneur de 10% de pouzzolane améliore la résistance. Au-delà de ce seuil, la résistance a tendance à se stabiliser quel que soit le type de superplastifiant utilisé figures (4.19, 4.20). Les résultats obtenus des essais de flexion sont en adéquation avec ceux de la compression figure (4.20).

IV.4. Combinaison Pouzzolane naturelle /polycarboxylate :

On remarque un optimum vers 10% sans l'ajout d'un superplastifiant à base de polycarboxylate mais avec l'ajout d'un superplastifiant à base de polycarboxylate améliorent la résistance.

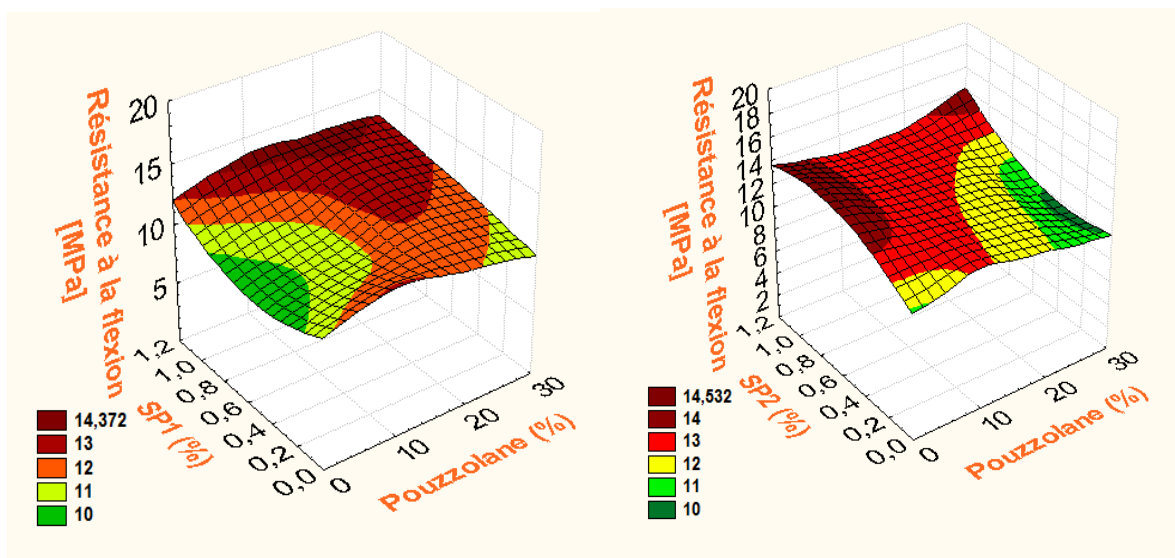


(a)

(b)

Figure 4.19 : Résistance a la compression en fonction de la pouzzolane et les superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate

Cependant, nous avons remarqué que les résistances à la flexion pour les combinaisons Fillers/polycarboxylate sont légèrement meilleures que ceux de la combinaison pouzzolane/polycarboxylate.



(a)

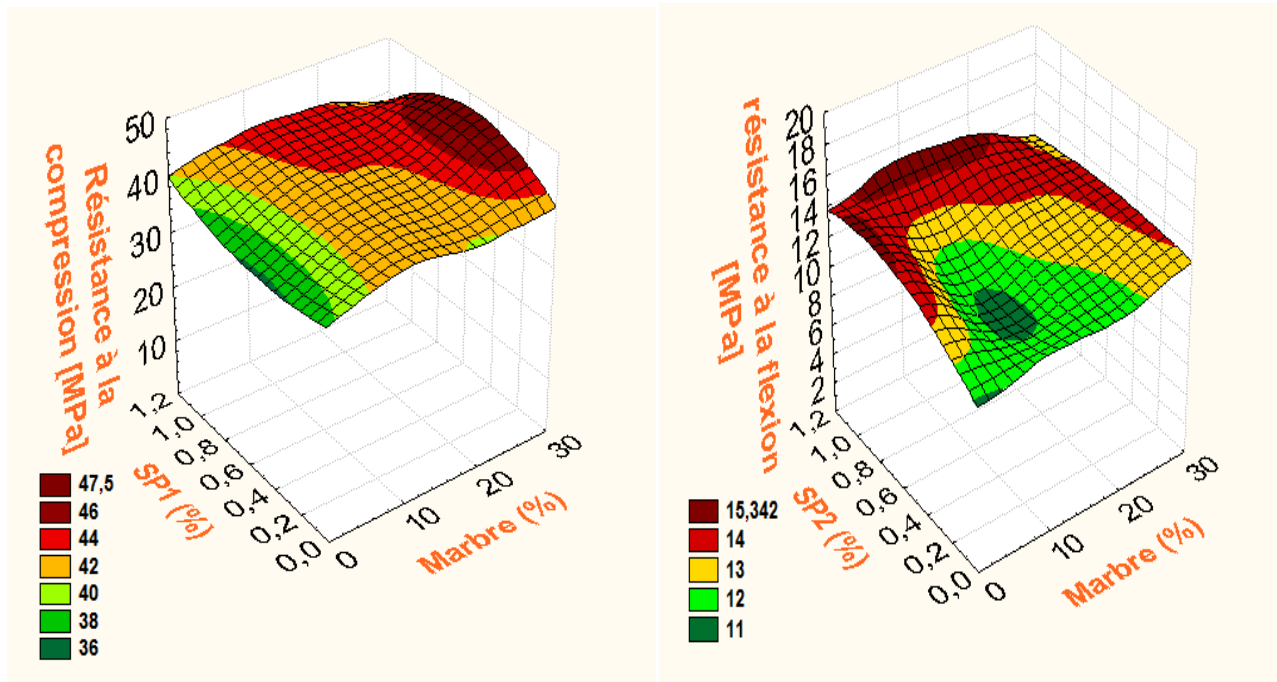
(b)

Figure 4.20 : résistance a la flexion en fonction de la pouzzolane et les superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate

IV.5. Combinaison poudre de marbre / éther poly carboxylique :

A partir des figures (4.21, 4.22), on distingue que 10% de poudre de marbre combiné a l'éther poly carboxylique ou au polycarboxylate a permis d'obtenir les meilleures résistances à la compression et à la traction.

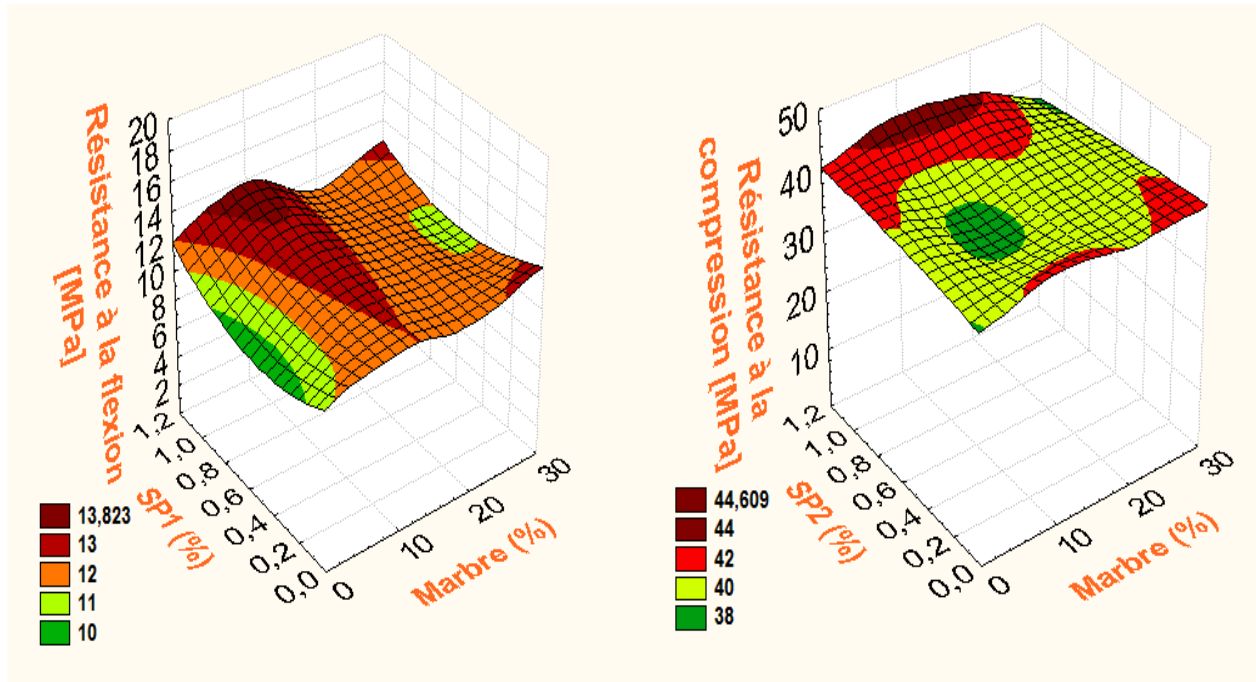
Par ailleurs, en comparant les trois types d'additions minérales, nous remarquons que la poudre de marbre à permis d'assurer les meilleures résistances.



(a)

(b)

Figure 4.21 : Resistance à la compression et en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants (a) éther poly carboxylique (b) polycarboxylate



(a)

(b)

Figure 4.22 : Résistance à la traction par flexion et en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants (a) éther poly carboxylique (b) polycarboxylate

Conclusion :

Les superplastifiants sont des adjuvants efficaces pour diminuer les seuils de cisaillement et participent aussi à réduire légèrement les viscosités plastiques des matériaux cimentaires.

Sur le plan rhéologique, les superplastifiants à base de polycarboxylate ont un effet meilleur par rapport aux superplastifiants à base d'éther poly carboxylique.

La pouzzolane utilisée ne semble pas être très perspicace sur le plan rhéologique lorsqu'elle est combinée à un superplastifiant. Par ailleurs, les fillers calcaires et la poudre de marbre s'associent parfaitement avec les polycarboxylate, améliorant ainsi la fluidité des mélanges. Ceci dit, qu'un taux de 10% de ces additions reste recommander pour assurer éventuellement la meilleure résistance mécanique.

References bibliographiques

- ADJOUDJ, M. EZZIANE, K. Kadri El Hadj., Ngo, T. . Kaci, A.« Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer», Construction and Building Materials, vol 70, 2014, pp. 549–559.
- Boukendakdji, O. Kenai, S. Kadri, RH. Rouis, F. « Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete». Construction and building materials, vol 23(7), 2009, pp.2593–8.
- WALLEVIK, O. H. WALLEVIK, J.E. «rheology as a tool in concrete science », the use of rheographs and workability boxes. cement and concrete research,2011,41,1279-1288.

Chapitre V



Modélisation

Résumé

Dans le précédent chapitre, nous avons présenté l'influence de la composition des mortiers sur les paramètres rhéologiques et sur la résistance mécanique. Les paramètres étudiés sont: le taux de substitution des additions minérales et leurs natures (fillers calcaires, pouzzolane et poudre de marbre), le type et le dosage des superplastifiants.

Dans ce chapitre, les résultats obtenus vont être exploités comme une base de données pour construire et valider des modèles de calcul pour le seuil de cisaillement, la viscosité plastique et la résistance mécanique des mortiers à partir de leur composition.

Sommaire du chapitre 5

I.	Introduction.....	85
II.	Modèles relatifs au seuil de cisaillement.....	85
III.	Modèles relatifs à la viscosité.....	94
IV.	Modèles relatifs à la résistance mécanique.....	103
V.	Conclusion.....	112

I. Introduction :

Afin de vérifier la corrélation des modèles établis avec nos résultats expérimentaux, les paramètres rhéologiques et les résistances des mortiers étudiés ont été calculées en utilisant chaque modèle. Les résultats ont été ensuite comparés avec nos mesures expérimentales.

La méthode d'optimisation des erreurs a été utilisée pour caler les paramètres du modèle. Elle consiste à minimiser l'erreur quadratique moyenne qui s'exprime par l'équation :

$$mse = \sqrt{\frac{\sum(V_{mes} - V_{modèle})^2}{n}} \quad (5.1)$$

Où :

V_{mes} : la valeur expérimentale.

$V_{modèle}$: la valeur calculée par le modèle.

n : est le nombre de mesures pris en compte dans l'ajustement.

Le pourcentage de l'erreur est calculé comme étant le rapport entre l'erreur quadratique moyenne et la moyenne des mesures.

II. Modèles relatifs au seuil de cisaillement :

II.1. Combinaison Filler/SP1

N=16	Seuil de cisaillement [Pa]			
	R= 0,93217461 R²= 0,86894949 Adjusted R²= 0,84878788		F (2,13) =43,099 p<0,00000 Std.Error of estimate: 79,107	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	381,547	46,42648	8,21831	0,000002
Fillers (%)	15,186	1,76889	8,58501	0,000001
SP1(%)	-153,473	43,41578	-3,53496	0,003660

Le modèle proposé est :

$$\tau_0 = 381,547 + 15,186 * (\text{Fillers}) - 153,473 * (\text{SP1}) \quad (5.2)$$

A partir de l'étude statistique, il est clair que les fillers et le SP1 avec des probabilités respectives de 0,000001 et 0,003660 (< 5%) ont une influence significative sur le seuil de cisaillement, et qu'il est peu probable que cette corrélation soit due au hasard. La dépendance est fortement significative et le coefficient de détermination est assez élevé (86,89%).

La figure 5.1 représente la comparaison des seuils de cisaillement calculés avec le modèle et ceux mesurés. Elle montre que les points (mesure-modèle) se concentrent sur la première bissectrice ($y = x$) avec une erreur moyenne de l'ordre de $\pm 3,60\%$.

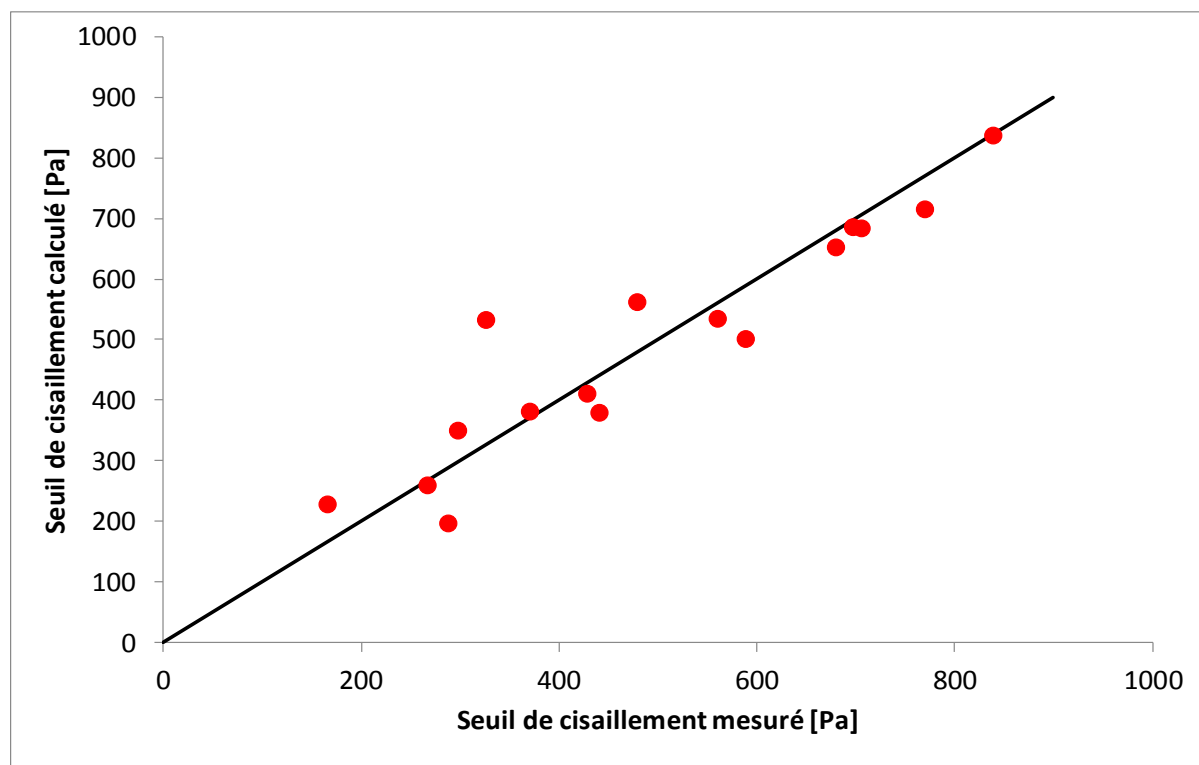


Figure 5.1. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils de cisaillement expérimentaux

mse	17,82659455
% Erreur	3,606929348

II.2. Combinaison Filler/SP2

N=16	Seuil de cisaillement [Pa]			
	R=0,88409623		R ² =0,78162615	
	F (2,13) =23,265		p<0,00005	
			Adjusted R ² =0,74803017	
			Std.Error of estimate: 115,94	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	379,771	68,04184	5,58143	0,000089
Fillers (%)	16,023	2,59246	6,18051	0,000033
SP2(%)	-183,670	63,62942	-2,88656	0,012732

Le modèle proposé est :

$$\tau_0 = 379,771 + 16,023 * (\text{Fillers}) - 183,670 * (\text{SP2}) \quad (5.3)$$

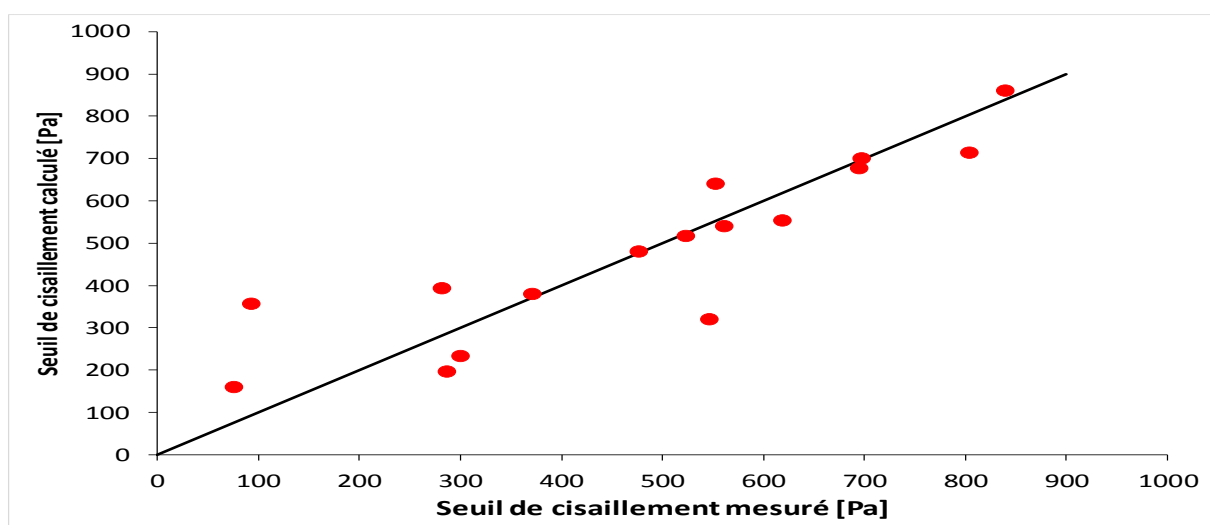


Figure 5.2. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils de cisaillement expérimentaux

mse	26,1263466
% Erreur	5,41636546

Le dépouillement des résultats statistiques confirme que la dépendance du seuil aux deux types d'additions observée reste significative ($p < 0,00005$) même si le coefficient de détermination est légèrement inférieur au précédent.

Par ailleurs, il est clair, à partir des deux modèles (5.2) et (5.3), que le SP2 (coef = 183,67) a une plus grande influence sur le seuil de cisaillement par rapport au SP1 (coef = 153,47).

II.3. Combinaison Pouzzolane/SP1 :

N=16	Seuil de cisaillement [Pa]			
	R=0 ,95432228	R ² = 0,91073101	Adjusted R ² =0 ,89699732	
	F(2,13)=66,314	p<0,00000	Std.Error of estimate: 56,498	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	362,513	33,15725	10,93314	0,00000
Pouz (%)	13,926	1,26332	11,02303	0,00000
SP1(%)	-103,398	31,00705	-3,33468	0,005377

Le modèle proposé est :

$$\tau_0 = 362,513 + 13,926 * (\text{Pouzzolane}) - 103,398 * (\text{SP1}) \quad (5.4)$$

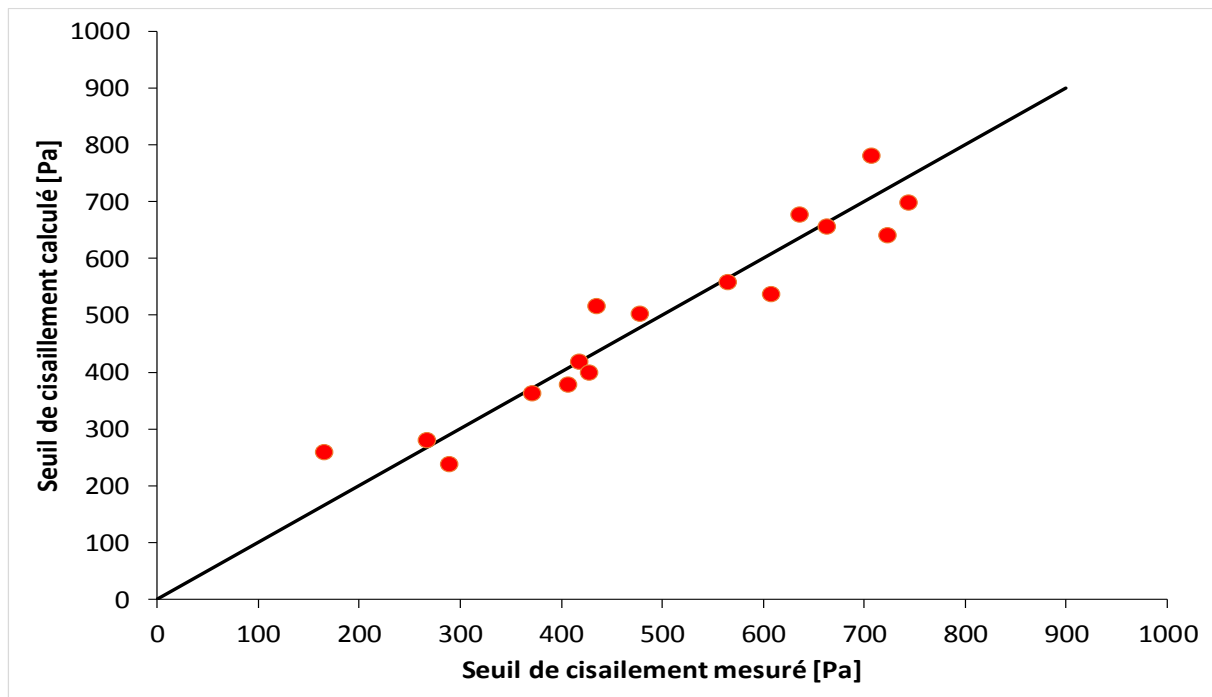


Figure 5.3. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils de cisaillement expérimentaux

mse	12,7315461
% Erreur	2,57802537

L'étude de la régression multiple pour la combinaison (Pouzzolane-SP1) confirme encore une fois, que le seuil de cisaillement est fonction des additions organiques et minérales. Il en ressort également que les additions minérales ont un effet positif sur le seuil de cisaillement c'est-à-dire plus on ajoute les additions minérales, plus grand est le seuil de cisaillement.

Par contre l'effet des superplastifiants est plutôt négatif. En effet, l'augmentation de la teneur des superplastifiants a tendance à diminuer le seuil de cisaillement. D'où l'intérêt d'utiliser les superplastifiants dans les bétons.

La figure 5.4 qui représente la comparaison des seuils de cisaillement calculés avec le modèle et ceux mesurés pour la combinaison montre que les points (mesure-modèle) se concentrent aussi sur la première bissectrice ($y = x$) avec une erreur moyenne de l'ordre de $\pm 2,57\%$.

II.4. Combinaison Pouzzolane/SP2 :

N=16	Seuil de cisaillement [Pa]			
	R=0 ,87873980	R ² =0 ,77218364	Adjusted R ² =0 ,73713497	
	F (2,13) =22,032	p<0,00007	Std.Error of estimate: 106,77	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	316,6661	62 ,664	5,05340	0 ,000221
Pouz (%)	15,3189	2,38756	6,41614	0 ,000023
SP2(%)	-99,7361	58,60032	-1,70197	0,112538

Le modèle proposé est :

$$\tau_0 = 316,6661 + 15,3189 * (\text{Pouzzolane}) - 99,7361 * (\text{SP2}) \quad (5.5)$$

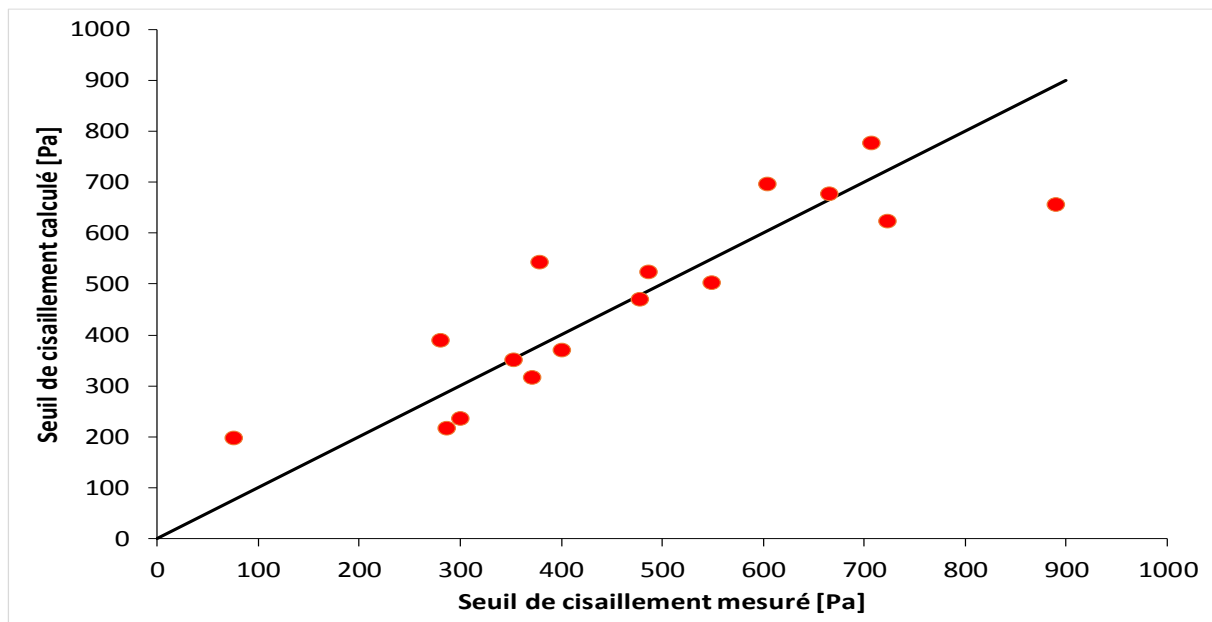


Figure 5.4. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils de cisaillement expérimentaux

mse	24,0613919
% Erreur	5,10156248

En comparant les mortiers, il semble que le SP2 à base de polycarboxylate contribue moins sur la modification des paramètres rhéologiques en présence de la pouzzolane ($p=11\%$).

II.5. Combinaison poudre de marbre /SP1 :

N=16	Seuil de cisaillement [Pa]			
	R=0 ,91213524	R ² =0 ,83199069	Adjusted R ² =0 ,80614310	
	F(2,13)=32,188	p<0,00001	Std.Error of estimate: 79,438	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	400,6139	46,62075	8,59304	0 ,000001
Marbre (%)	13,7010	1,77630	7,71323	0 ,000003
SP1 (%)	-96,3372	43,59746	-2,20970	0,045676

Le modèle proposé est :

$$\tau_0 = 400,6139 + 13,7010 * (\text{Marbre}) - 96,3372 (\text{SP1}) \quad (5.6)$$

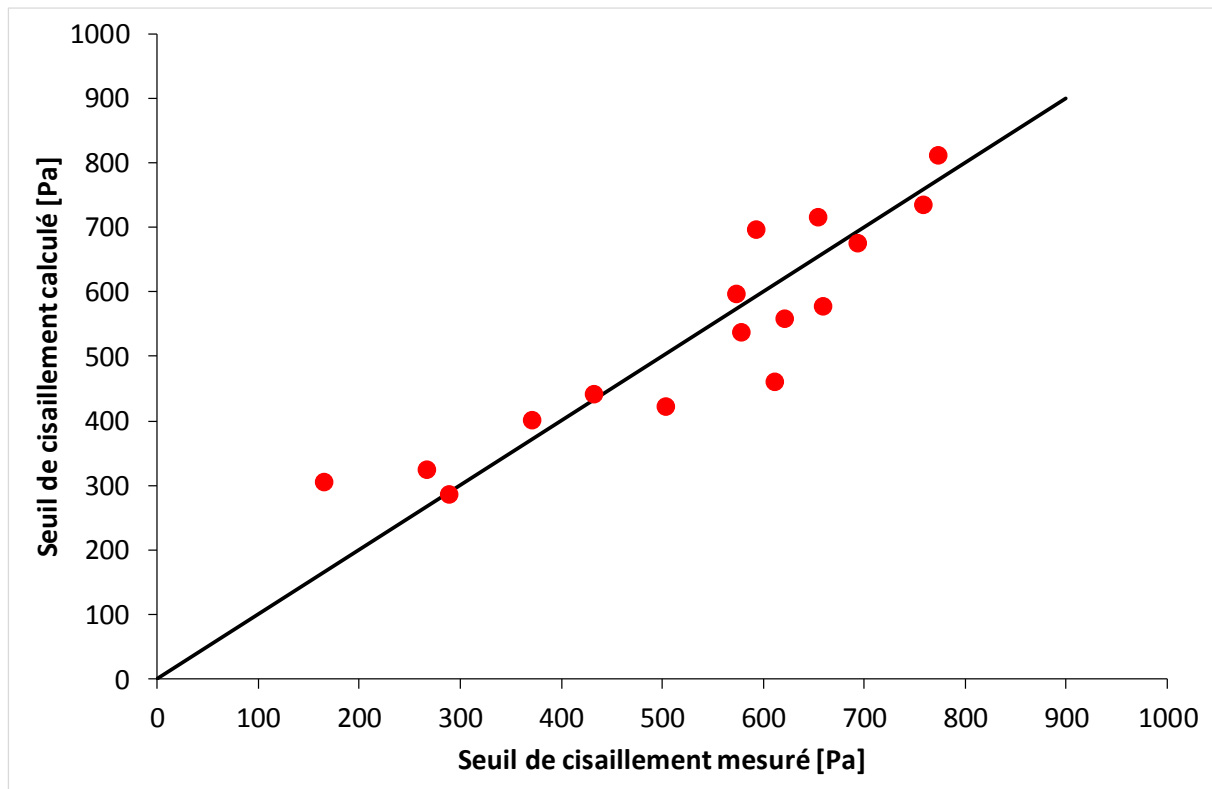


Figure 5.5. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils de cisaillement expérimentaux

mse	17,9011915
% Erreur	3,35306402

A partir de l'étude statistique, il est clair que la poudre de marbre et le SP1 avec des probabilités largement inférieures à 5% ont eux aussi une influence combinée avec le SP1 sur le seuil de cisaillement. Ce résultat est aussi justifié par le coefficient de détermination (83,19%).

Le modèle établi est intéressant puisqu'il présente un pourcentage d'erreur de l'ordre de 3,35% entre les seuils mesurés et calculés par le modèle.

II.6. Combinaison poudre de marbre /SP2 :

N=16	Seuil de cisaillement [Pa]			
	R=0 ,92328404	R ² =0 ,85245343	Adjusted R ² =0 ,82975395	
	F (2,13) =37,554	p<0,00000	Std.Error of estimate: 88,805	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	421,396	52,11798	8,08542	0 ,000002
Marbre (%)	13,311	1,98575	6,70336	0 ,000015
SP2 (%)	-267,717	48,73820	-5,59297	0,000103

Le modèle proposée est :

$$\tau = 421,396 + 13,311 * (\text{Marbre}) - 267,717 * (\text{SP2}) \quad (5.7)$$

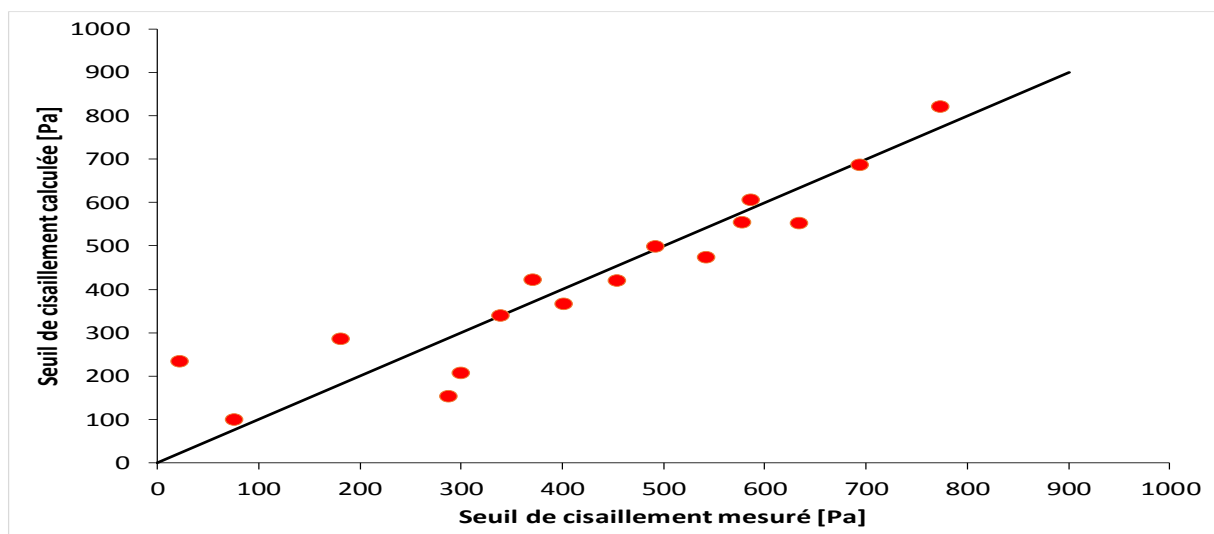


Figure 5.6. Comparaison entre les seuils de cisaillement calculés par le modèle et les seuils de cisaillement expérimentau

mse	20,0119893
% Erreur	4,76163454

A partir du modèle établi, dont le pourcentage d'erreur est de l'ordre de 4,76%, il est clair que le superplastifiant à base de polycarboxylate (SP2) a une meilleure influence lorsqu'il est combiné à la poudre de marbre.

On peut conclure que l'ensemble des modèles relatifs au seuil montre que les additions minérales et organiques influent, tous les deux, significativement sur la variation du seuil de cisaillement. Si les additions minérales ont tendance à augmenter le seuil de cisaillement, les superplastifiants ont plutôt un effet inverse sur ce paramètre rhéologique.

Les superplastifiants de la famille des polycarboxylates (SP2) semblent être plus efficaces lorsqu'ils sont combinés avec la poudre de marbre ou les fillers calcaires. Cet effet est moins prononcé lorsque la pouzzolane est utilisée comme addition minérale.

III. Modèles relatifs à la viscosité :

III.1. Combinaison Fillers calcaires / SP1 :

N=16	Viscosité plastique [Pa.s]			
	R=0,78701250		R ² =0,61938867	Adjusted R ² =0,56083308
	F (2,13) =10,578		p<0,00188	Std.Error of estimate:0,47591
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	2,687718	0,279301	9,62303	0,00000
Fillers (%)	0,047375	0,010642	4,45186	0,000652
SP1(%)	-0,301958	0,261188	-1,15609	0,268449

Le modèle proposé est :

$$\mu = 2,687718 + 0,047375 * (\text{Fillers}) - 0,301958 * (\text{SP1}) \quad (5.8)$$

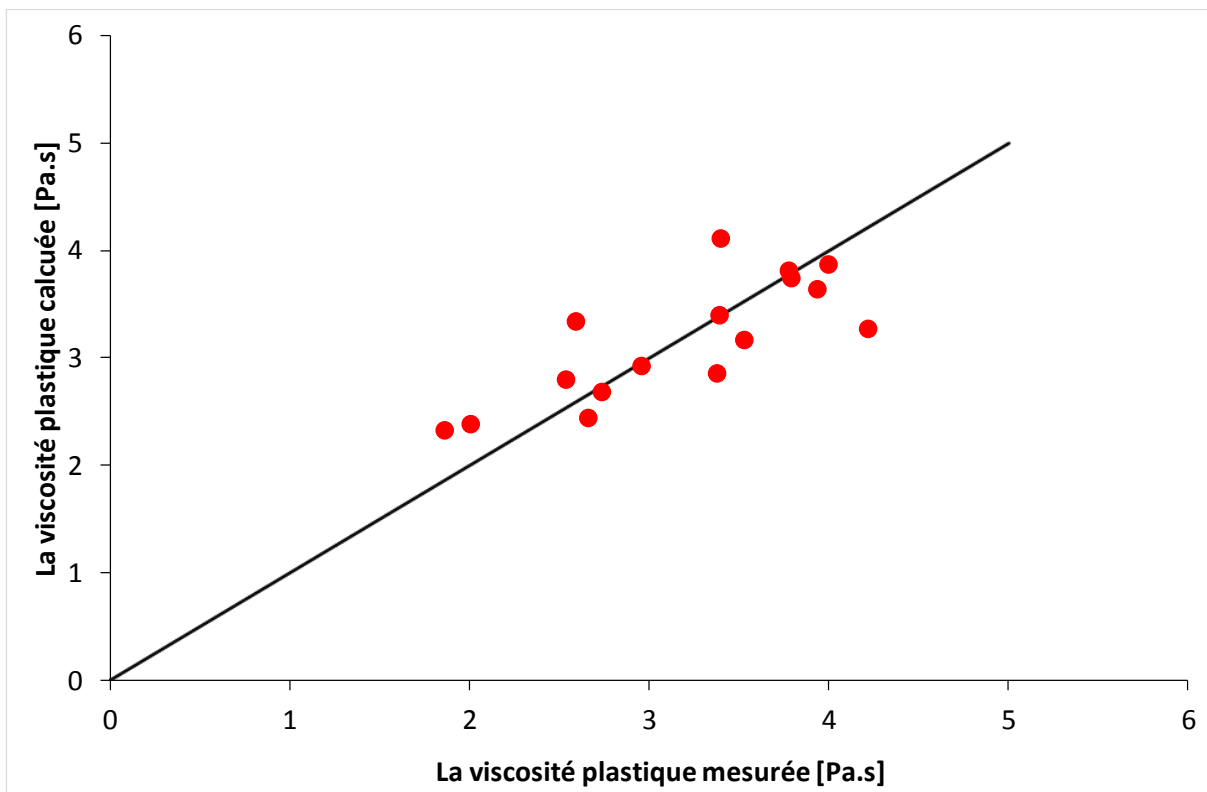


Figure 5.7. Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales.

mse	0,107282544
% Erreur	3,379969593

A partir de l'étude statistique, il est clair que le SP1 de la famille d'éther polycarboxylique avec une probabilité de 0,268 (> 5%) n'a pas d'influence sur la viscosité. Le paramètre SP1 peut être négligé dans le modèle proposé.

La figure 5.7 représente la comparaison des viscosités calculés avec le modèle et celles mesurées. Elle montre que les points (mesure-modèle) se concentrent sur la première bissectrice ($y = x$) avec une erreur moyenne de l'ordre de $\pm 3,37\%$, ce qui montre que le modèle est intéressant.

III.2. Combinaison Fillers Calcaires / SP2 :

N=16	Viscosité plastique [Pa.s]			
	R=0,81780532 R ² =0,66880553 Adjusted R ² =0,61785254 F(2,13)=13,126 p<0,00076 Std.Error of estimate:0,46219			
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	2,823989	0,271252	10,41095	0,00000
Fillers (%)	0,041975	0,010335	4,06146	0,001347
SP2(%)	-0,792319	0,253662	-3,12353	0,008073

Le modèle proposé est :

$$\mu = 2,823989 + 0,041975 * (\text{Fillers}) - 0,792319 * (\text{SP2}) \quad (5.9)$$

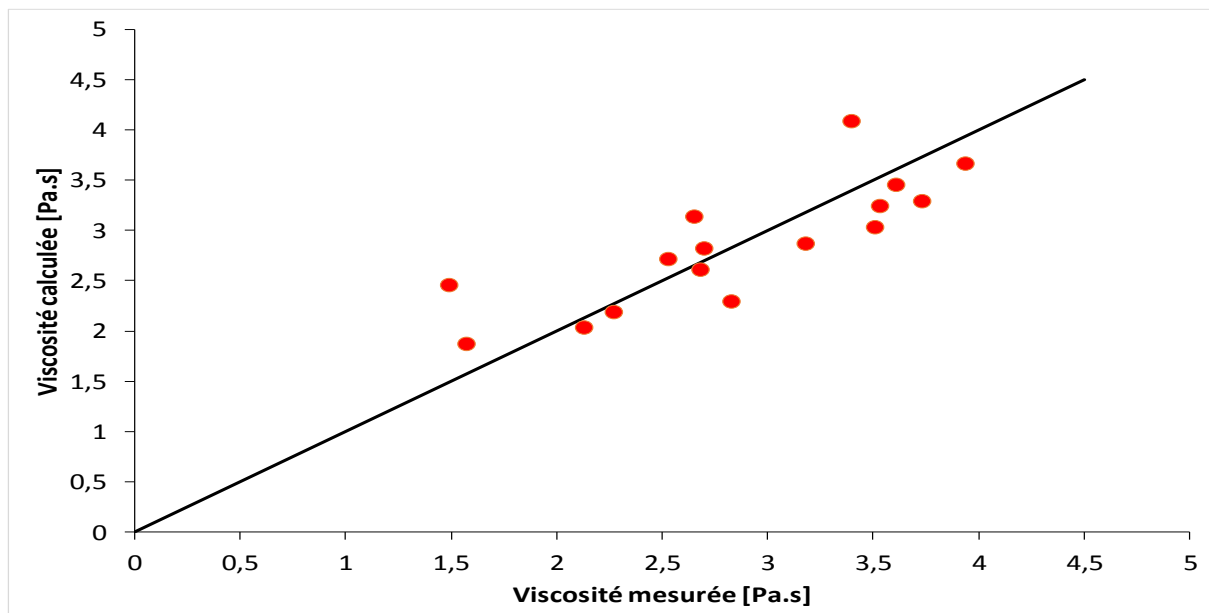


Figure 5.8. Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales.

mse	0,10415389
% Erreur	3,64254058

L'effet des SP2 de la famille de polycarboxylate semble avoir une meilleure influence sur la viscosité. La probabilité de 0,008 largement inférieure à 5%, montre que le SP2 à une influence significative sur la viscosité.

Les modèle 5.8 et 5.9 montrent que les fillers calcaires augmentent la viscosité alors que les superplastifiants contribuent à diminuer la viscosité.

III.3. Combinaison Pouzzolane /SP1 :

N=16	Viscosité plastique [Pa.s]			
	R=0 ,75545189		R²=0 ,57070755	
	F(2,13)=8,6412		p<0,00410	
			Adjusted R²= 0,50466256	
			Std.Error of estimate: 0,46556	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	2,731163	0 ,273226	9,99599	0 ,00000
Pouz (%)	0,040800	0 ,010410	3,91925	0 ,001761
SP1(%)	-0 ,354217	0,255507	-1,38633	0,188965

Le modèle proposé est :

$$\mu=2,731163+0,040800*(\text{Pouzzolane})-0,354217*(\text{SP1}) \quad (5.10)$$

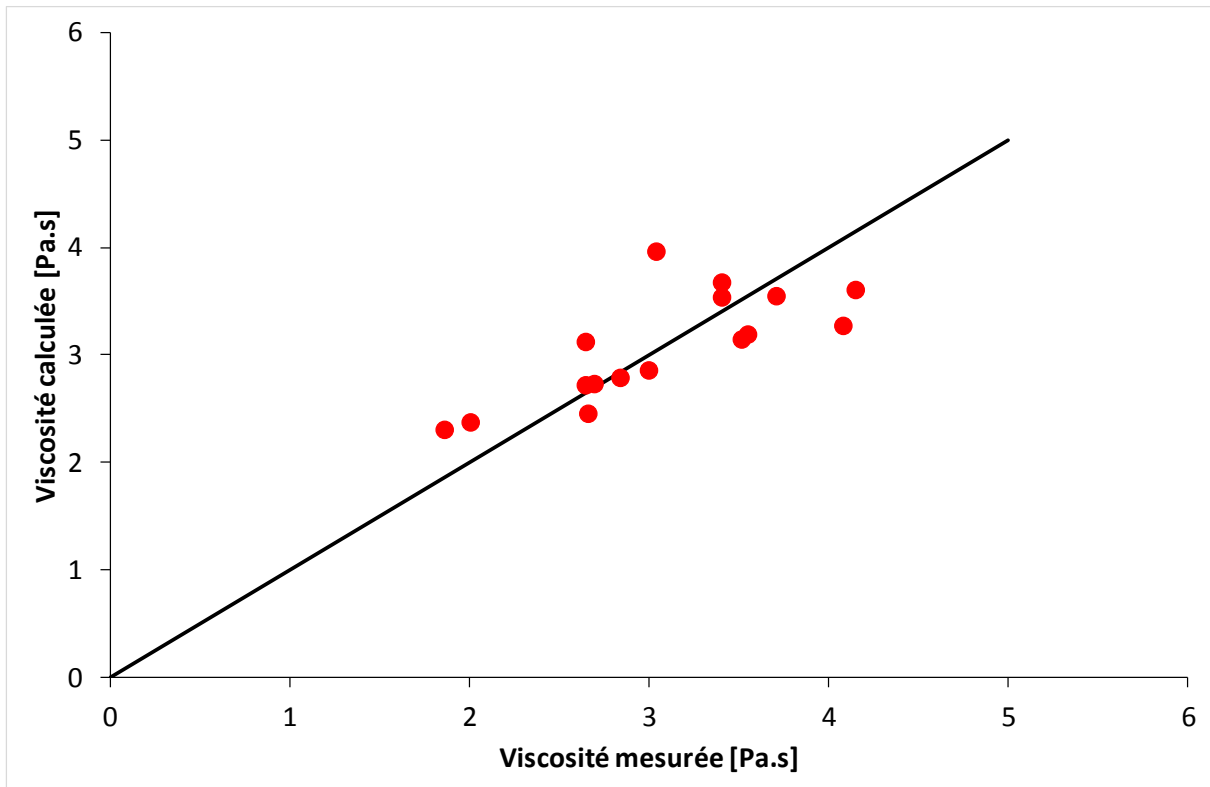


Figure 5.9. Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales

mse	0,104911811
% Erreur	3,408994679

Le dépouillement des résultats statistiques confirme que la dépendance observée est globalement significative ($p < 0,00410$). Par contre l'effet du SP1 sur la viscosité peut être négligé.

III.4. Combinaison Pouzzolane / SP2 :

N=16	Viscosité plastique [Pa.s]			
	R=0,84864987	R ² = 0,72020661	Adjusted R ² = 0,67716147	
	F (2,13) =16,731	p<0,00025	Std.Error of estimate: 0,32200	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	2,843770	0,188976	15,04831	0,00000
Pouz (%)	0,027825	0,007200	3,86449	0,001953
SP2(%)	-0,760693	0,176721	-4,30448	0,000856

Le modèle proposé est :

$$\mu = 2,843770 + 0,027825 * (\text{Pouzzolane}) - 0,760693 * (\text{SP2}) \quad (5.11)$$

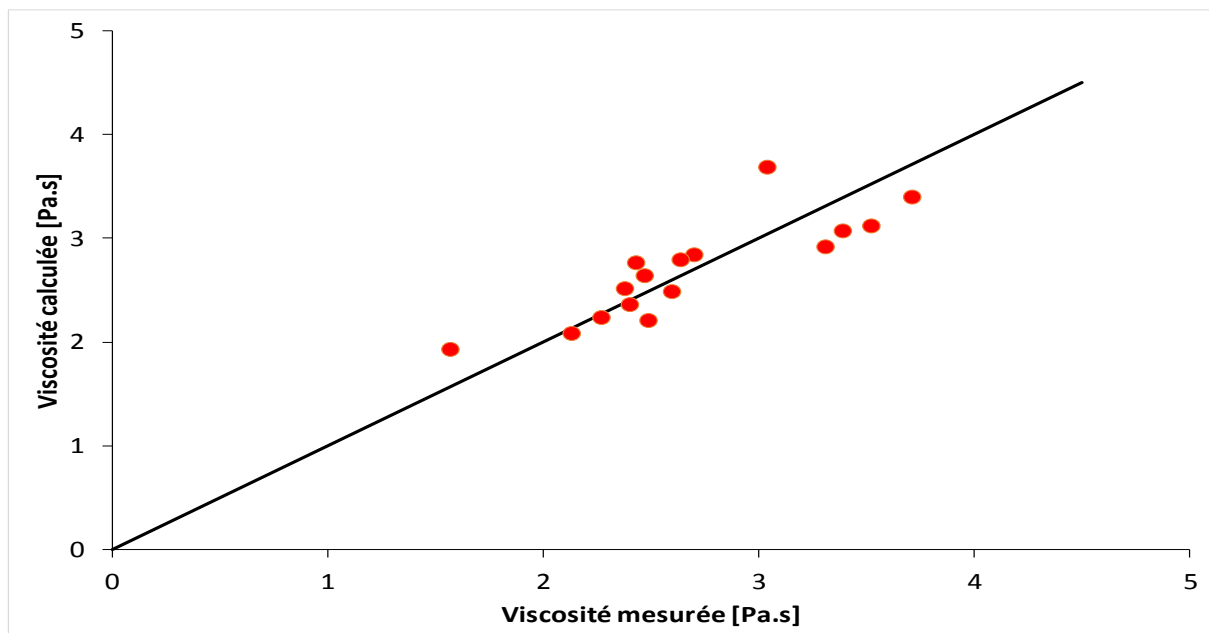


Figure 5.10. Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales

mse	0,07256212
% Erreur	2,6968501

Les résultats obtenus confirment que la famille des polycarboxylates (SP2) ont une influence sur la viscosité.

III.5. Combinaison poudre de marbre/SP1 :

N=16	Viscosité plastique [Pa.s]			
	R= 0,84241909		R²=0,70966992	
	F(2,13)=15,888		Adjusted R²= 0,66500375	
	p<0,00032		Std.Error of estimate:0,45798	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	2,644005	0,268779	9,837095	0,00000
Marbre (%)	0,057725	0,010241	5,636800	0,000081
SP1(%)	-0,014006	0,251349	-0,055723	0,956409

Le modèle proposé est :

$$\mu = 2,644005 + 0,057725 * (\text{Marbre}) - 0,014006 * (\text{SP1}) \quad (5.12)$$

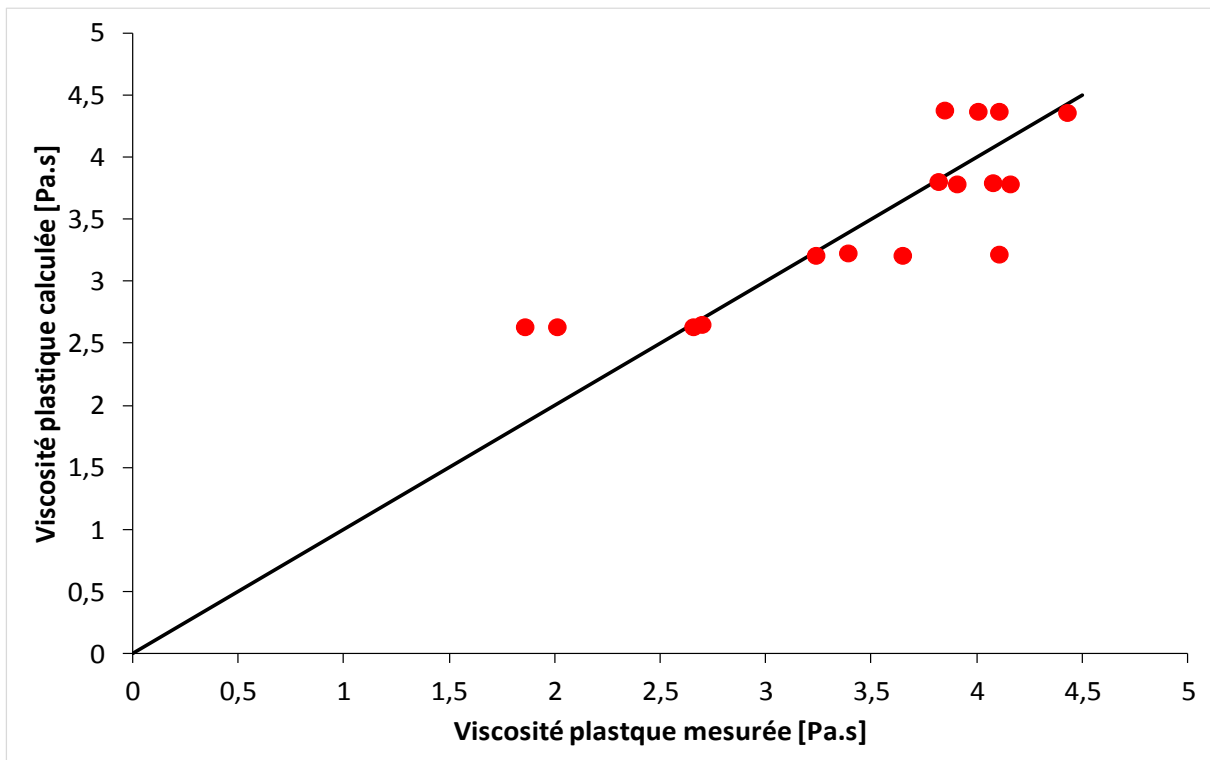


Figure 5.11. Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales

Mse	0,10320435
% Erreur	2,94922232

III.6. Combinaison poudre de marbre/SP2 :

N=16	Viscosité plastique [Pa.s]			
	R=0 ,91785029	R ² = 0,84244915	Adjusted R ² = 0,81821056	
	F (2,13) =34,757	p<0,00001	Std.Error of estimate: 0,30771	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	2,779248	0 ,180589	15,38987	0 ,00000
Marbre (%)	0,044275	0 ,006881	6,43473	0 ,000022
SP2(%)	-0 ,895331	0,168878	-5,30163	0,000143

Le modèle proposé est :

$$\mu = 2,779248 + 0,044275 * (\text{Marbre}) - 0,895331 * (\text{SP2}) \quad (5.13)$$

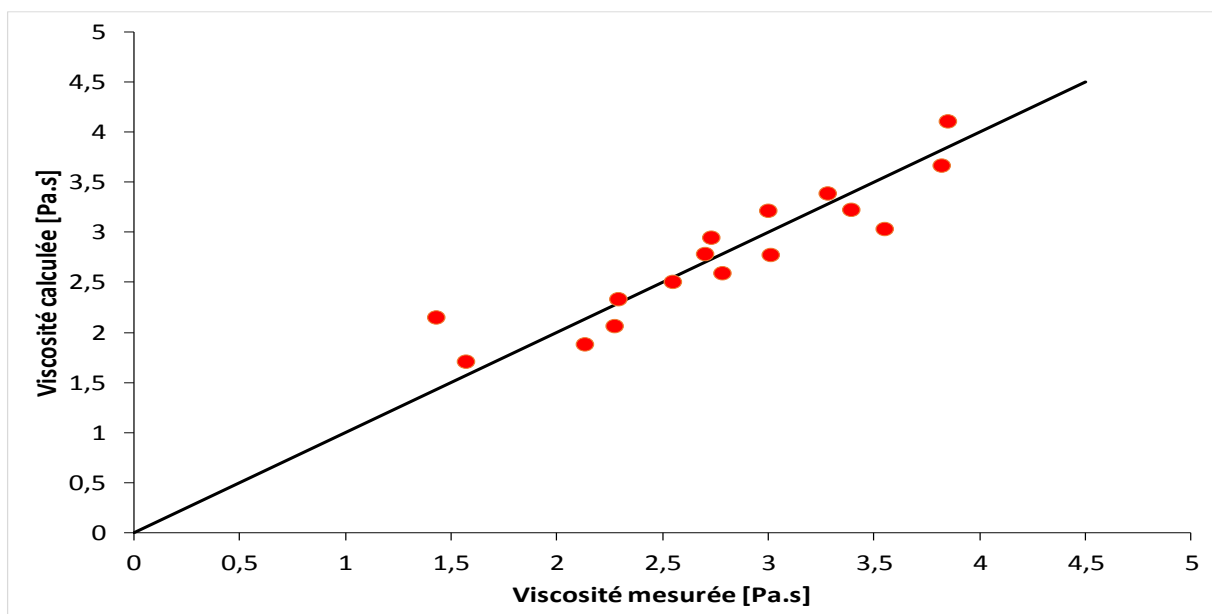


Figure 5.12. Comparaison entre les viscosités plastiques calculées par le modèle et les viscosités expérimentales.

mse	0,06934178
% Erreur	2,50161985

La poudre de marbre a une influence significative sur la viscosité. L'augmentation du taux de la poudre de marbre est signe d'une croissance de la viscosité. Par contre la poudre de marbre semble avoir une meilleure compatibilité avec les superplastifiants à base de polycarboxylate (SP2). Le SP1 semble ne pas affecter la viscosité des mortiers quelque soit l'addition utilisée.

IV. Modèles relatifs à la résistance mécanique :

IV.1. Combinaison fillers calcaires/SP1 :

N=16	Résistance mécanique[MPa]			
	R=0,66956795 R²= 0,44832124 Adjusted R²=0 ,36344758			
	F (2,13) =5,2822 p<0,02094 Std.Error of estimate: 2,2133			
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	37,61696	1,298954	28,95942	0 ,00000
Fillers (%)	0,13771	0 ,049491	2,78260	0 ,015538
SP1(%)	2,04042	1,214719	1,67975	0,116864

Le modèle proposé est :

$$R_c = 37,61696 + 0,13771 * (\text{Fillers}) + 2,04042 * (\text{SP1}) \quad (5.14)$$

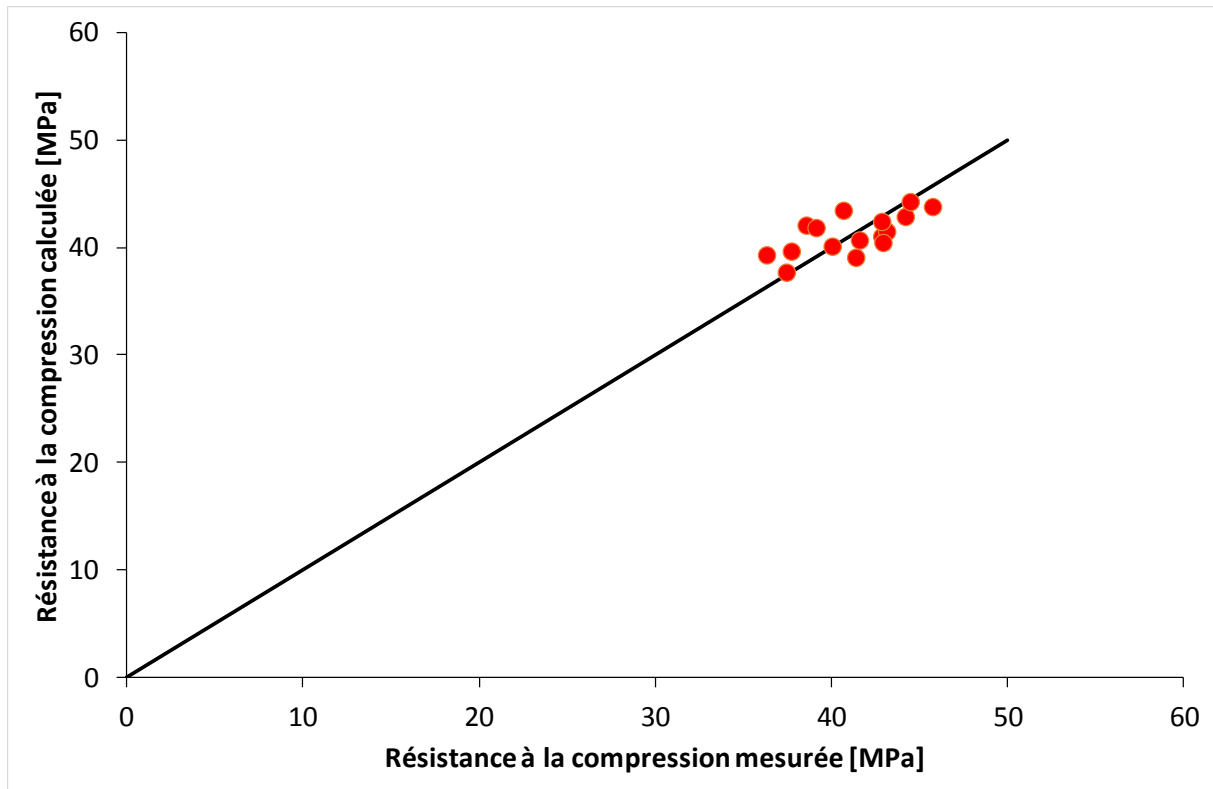


Figure 5.13. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales

mse	0,49876565
% Erreur	1,21021438

IV.2. Combinaison fillers calcaires/SP2 :

N=16	Résistance mécanique[MPa]			
	R= 0,30458350	R ² =0,09277111	Adjusted R ² = -----	
	F (2,13) =0,66467	p<0,53108	Std.Error of estimate: 3,1009	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	39,92369	1,819870	21,93767	0,00000
Fillers (%)	0,04631	0,069339	0,66788	0,515893
SP2(%)	-1,59946	1,701854	-0,93983	0,364439

Le modèle proposé est :

$$R_c = 39,92369 + 0,04631 * (\text{Fillers}) - 1,59946 * (\text{SP2}) \quad (5.15)$$

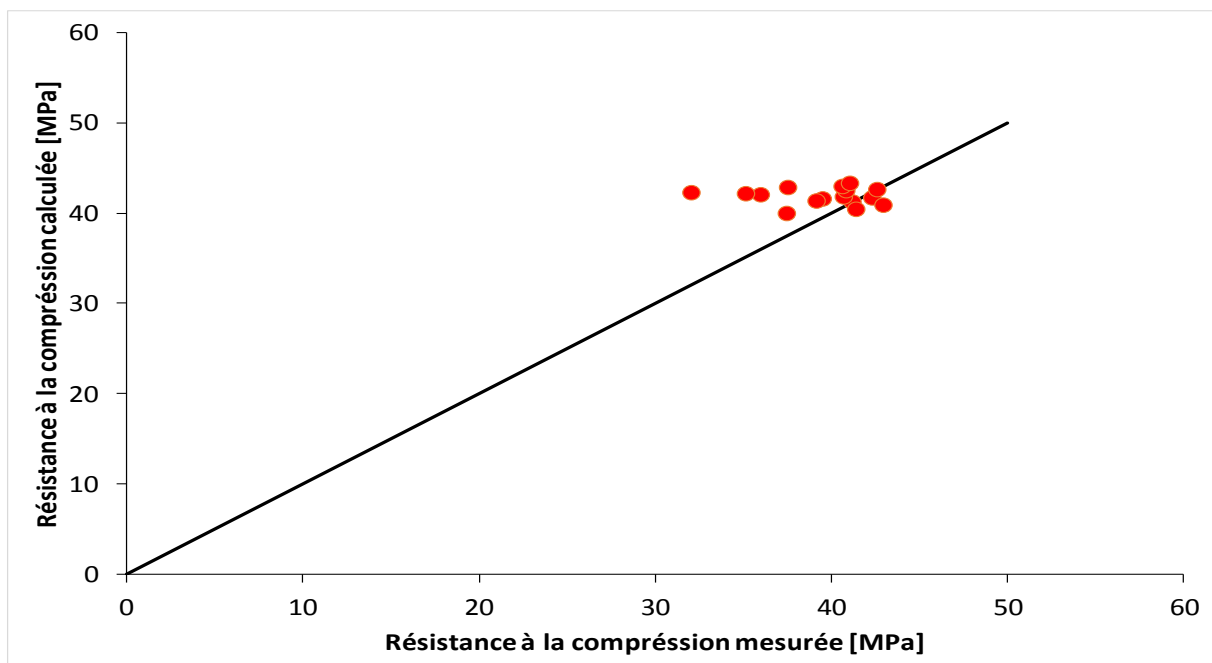


Figure 5.14. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales

mse	0,99033567
% Erreur	2,51234672

L'analyse des résultats statistiques obtenus montre que les fillers calcaires ont une influence significative sur la résistance lorsqu'ils sont combinés au SP1. Ce résultat est moins clair lorsque le SP2 est utilisé comme adjuvant ($p=0,515$ et $0,515 > 5\%$).

Même si le pourcentage d'erreur est de 2,51%, le modèle (5.15) est loin d'être efficace si on se réfère au coefficient de détermination (0,092).

A partir des modèles proposés, nous remarquons l'effet bénéfique des fillers sur la résistance puisqu'elle améliore la compacité des mélanges.

IV.3. Combinaison Pouzzolane/SP1 :

N=16	Résistance mécanique[MPa]			
	R=0 ,72968277 R²= 0,53243694		Adjusted R²= 0,46050416	
	F(2,13)=7,4019 p<0,00714		Std.Error of estimate: 1,5350	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	36,87389	0,900863	40,93174	0 ,00000
Pouz (%)	0,12688	0 ,034324	3,69649	0 ,002688
SP1(%)	0,89935	0,842443	1,06755	0,305147

Le modèle proposé est :

$$R_c = 36,87389 + 0,12688 * (\text{Pouzzolane}) + 0,89935 * (\text{SP1}) \quad (5.16)$$

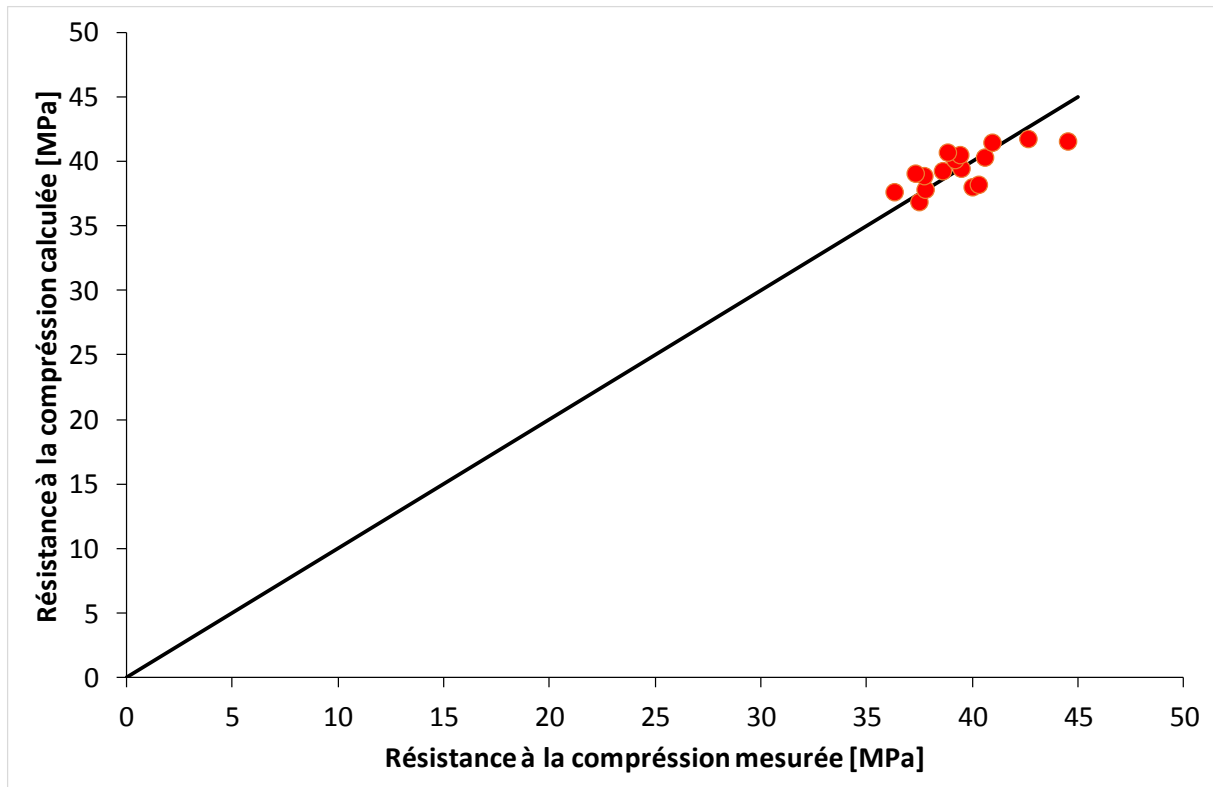


Figure 5.15. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales.

mse	0,34590856
% Erreur	0,87679304

IV.4. Combinaison Pouzzolane/SP2 :

N=16	Résistance mécanique[MPa]			
	R=0,55946237	R ² = 0,31299815	Adjusted R ² = 0,20730556	
	F(2,13)=2,9614	p<0,08714	Std.Error of estimate: 1,3991	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	39,41722	0,821091	48,00590	0,00000
Pouz (%)	-0,01453	0,031284	-0,46429	0,650120
SP2(%)	1,83437	0,767845	2,38898	0,032753

Le modèle proposé est :

$$R_c = 39,41722 - 0,01453 * (\text{Pouzzolane}) + 1,83437 * (\text{SP2}) \quad (5.17)$$

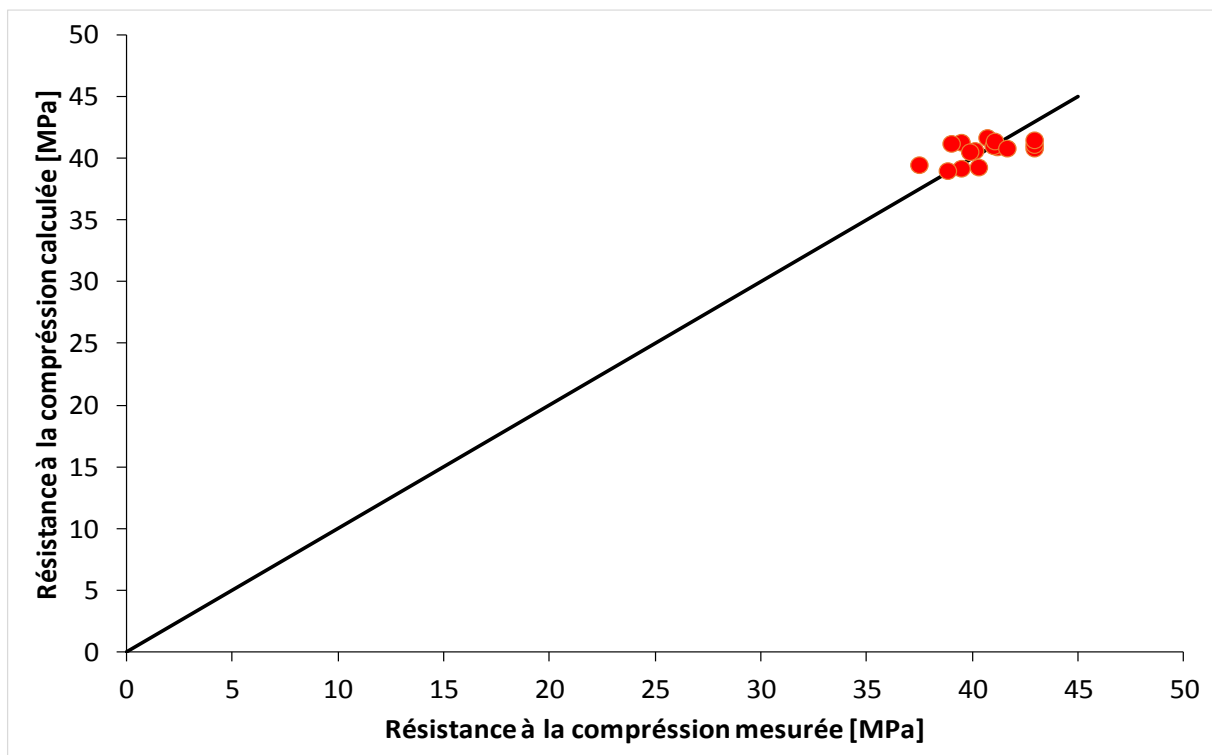


Figure 5.16. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales

mse	0,31527832
% Erreur	0,77702366

A partir des modèles (5.16) et (5.17), la pouzzolane semble aussi avoir un effet significatif sur la résistance. Les modèles établis doivent être considérés avec précaution si on se réfère au coefficient de détermination.

IV.4. Combinaison Poudre de marbre/SP1 :

N=16	Résistance mécanique[MPa]			
	R= 0,54706480 R ² = 0,29927990		Adjusted R ² = 0,19147680	
	F(2,13)=2,7762 p<0,09909		Std.Error of estimate: 2,4159	
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	38,24522	1,417818	26,97469	0,00000
Marbre (%)	0,11838	0,054020	2,19149	0,047229
SP1(%)	1,14801	1,325875	0,86585	0,402268

Le modèle proposé est :

$$R_c = 38,24522 + 0,11838 * (\text{Marbre}) + 1,14801 * (\text{SP1}) \quad (5.18)$$

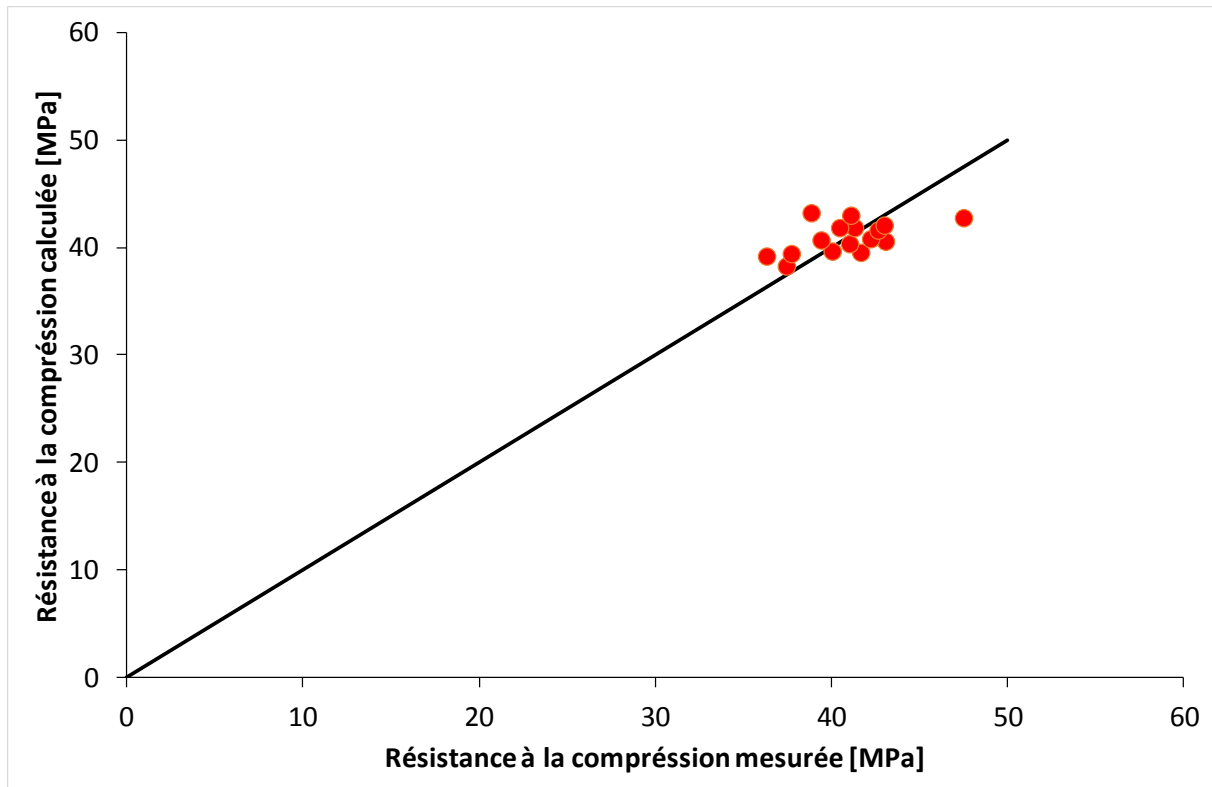


Figure 5.17. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales

Mse	0,54440641
% Erreur	1,33165307

IV.4. Combinaison Poudre de marbre/SP2 :

N=16	Résistance mécanique[MPa]			
	R = 0,28674201		R ² = 0,08222098	Adjusted R ² = -----
	F(2,13)=,58231		p<0,57253	Std.Error of estimate: 2,1165
	Coefficient	Std.Err.of Coefficient	T	P
Constante	40,08407	1,242125	32,27055	0,00000

Marbre (%)	-0,04025	0,047326	-0,85038	0,419506
SP2(%)	0,77181	1,161575	0,66445	0,518016

Le modèle proposé est :

$$R_c = 40,08407 - 0,04025 * (\text{Marbre}) + 0,77181 * (\text{SP2}) \quad (5.19)$$

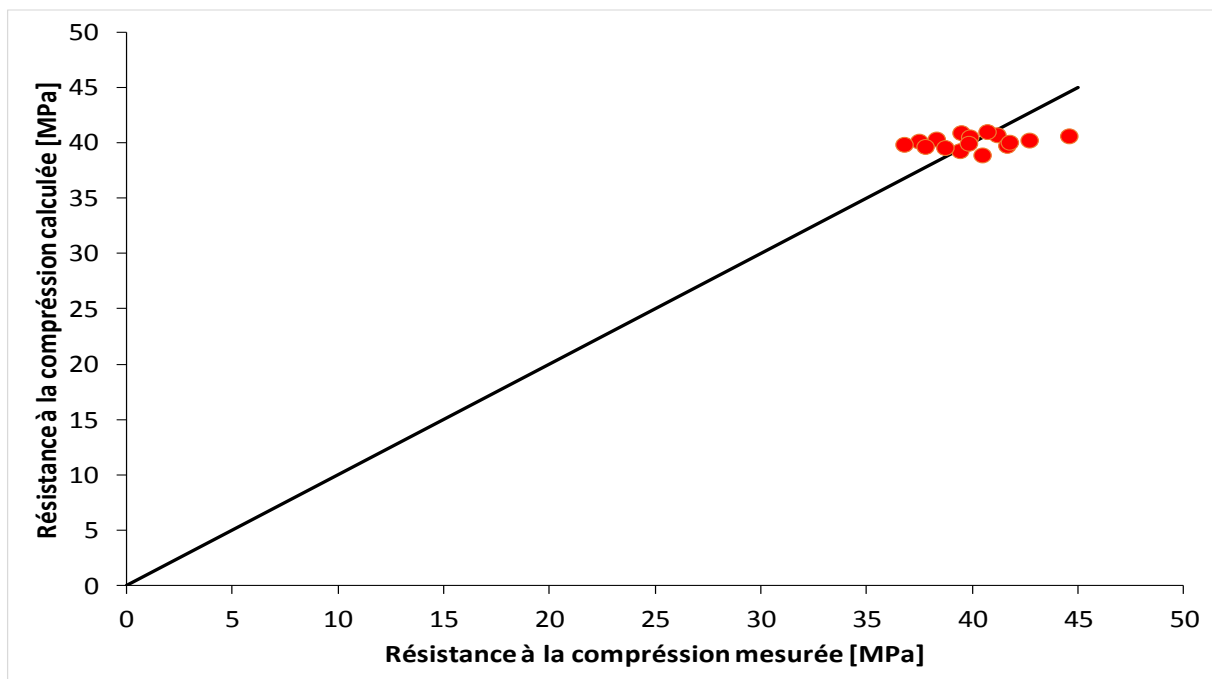


Figure 5.18. Comparaison entre les résistances mécaniques calculées par le modèle et les résistances expérimentales

mse	0,47694481
% Erreur	1,19059845

La poudre de marbre semble réagir de la même manière que les fillers calcaires. D'ailleurs, on peut remarquer que les modèles (5.14) et (5.18) se rapprochent.

Le type des superplastifiants ne semblent pas avoir d'influence sur la résistance mécanique surtout lorsqu'ils sont combinés à la poudre de marbre.

V. Conclusion :

Les modèles obtenus ont permis de mieux distinguer l'effet de chaque addition qu'elle soit minérale ou organique sur les paramètres rhéologiques et mécaniques des mortiers étudiés.

On peut déduire les conclusions suivantes :

- Le seuil de cisaillement accroit avec l'augmentation des additions minérales. Par contre, les additions organiques ont plutôt l'effet inverse sur le seuil de cisaillement.
- La viscosité est fortement corrélée à la teneur en additions minérales. Par ailleurs, elle semble peu dépendante des additions organiques.
- La résistance mécanique est significativement influencée par les additions minérales que par les additions organiques.
- Le superplastifiant à base de polycarboxylate a un meilleur effet sur les paramètres rhéologiques que le superplastifiant à base d'éther polycarboxylique.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES



Dans ce travail, nous avons étudié le comportement rhéologique des mortiers en combinant le ciment avec des additions minérales et organiques. A partir des résultats obtenus, plusieurs conclusions peuvent ressortir :

- L'incorporation des deux types de superplastifiant a permis d'améliorer la fluidité spécialement avec les fillers calcaires.
- Le superplastifiant à base de polycarboxylate est plus efficace par rapport à l'éther polycarboxylique. Par contre, le polycarboxylate semble perdre son efficacité lorsqu'il est employé avec la pouzzolane naturelle.
- A des teneurs de filler calcaires dépassant 10%, L'effet des superplastifiants devient moins significatif.
- Les deux superplastifiants permettent de réduire significativement le seuil de cisaillement et légèrement la viscosité plastique. Cependant, la nature du superplastifiant a peu d'influence sur la viscosité plastique.
- Les fillers calcaires et la poudre de marbre sont plus efficaces sur le plan rhéologique.
- La viscosité plastique augmente toujours avec le taux des additions minérales. L'incorporation de la pouzzolane naturelle a donné aux mélanges les viscosités plastiques les plus élevées.
- La poudre de marbre semble plus efficace pour diminuer le seuil de cisaillement mais en la combinant avec l'éther polycarboxylate, elle aboutit à des viscosités plus élevées.
- Le superplastifiant à base de polycarboxylate est compatible avec toutes les additions minérales, ce qui confirme l'interaction entre les superplastifiants et les additions minérales.
- Une corrélation a été distinguée entre le seuil de cisaillement et les affaissements des mélanges.

Perspectives :

- Dans l'avenir, il serait intéressant d'étaler cette recherche sur d'autres types d'additions minérales comme les cendres volantes et la fumée de silice ainsi que d'autres types d'additions organiques comme ceux à base de lignosulfonates.
- Il serait aussi judicieux d'étudier l'effet entre les superplastifiants et les agents de viscosité.
- Enfin, nous recommandons d'étaler cette recherche à l'échelle du béton afin de déterminer des modèles mathématiques qui peuvent être utilisés in situ.

