



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



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

MEMOIRE DE MASTER PROFESSIONNEL

SPECIALITE : GENIE CIVIL

OPTION : BATIMENT

Thème:

**ETUDE DES MORTIERS AUTOPLAÇANTS A BASE
D'ADDITIONS MINERALES ET ORGANIQUES**

Présenté par :

BOUKLI HACENE ZAKARYA

Soutenu le 18-06-2017 devant le jury composé de

M ^r A. BAGHLI	MA	Univ. Tlemcen	Président
M ^r N. HASSAINE	MA	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^r F.B. HOUTI	MA	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^r O. TALEB	MA	Univ. Tlemcen	Encadreur

Année Universitaire 2016 – 2017

Je voudrais dédier ce modeste travail A mes très chers parents qui m'ont tant soutenu et encouragé dans tout les domaines et surtout pour réaliser ce mémoire et qui ont veillé à ce que je sois ce que je suis devenu maintenant.

A mes grands parents et grandes mères

A ma sœur et mon petit frère

A ma fiancée

A toute ma famille

A mes chers amis : samir, hami,..

A mes beaux frère Hammed, Amine et Anes

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent travail.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon encadreur **Mr TALEB Omar** Maître assistant qui, malgré ces occupations professionnelles, a accepté sans réserve, de diriger ce travail. Il s'est grandement impliqué par ses directives, ses remarques et suggestions, mais aussi par ses encouragements, je lui est profondément reconnaissant.

Je tiens aussi à exprimer mes gratitude à **Mr BAGHLI Abdellatif** qui a accepté d'honorer la présidence de ce jury.

Je tiens aussi à exprimer mes vifs remerciements à **Mr HASSAINE Nasreddine** et **Mr HOUTI Farid Brahim** pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir acceptés d'examiner ce modeste travail.

Je tiens à remercier tous les enseignants qui nous ont suivis durant notre formation et particulièrement **Mr BAGHLI Abdellatif** pour ces valeureux conseils.

Je tiens ensuite à remercier mes parents ainsi que ma fiancée pour le soutien inconditionnel dont ils ont fait preuve depuis que mon projet professionnel est défini. Merci pour le soutien financier, moral, psychologique et matériel. Si je suis ici aujourd'hui, c'est grâce à vous!

Au terme de ce modeste travail je tiens à remercier chaleureusement et respectueusement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste projet de fin d'étude.

Enfin, je remercie mes amis et camarades de promotion pour les cinq années qu'on a passé ensemble, dans les meilleurs moments comme dans les pires.

Merci à tous

RESUME

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à la compréhension des principaux mécanismes d'action des additions minérales (fillers calcaires et poudre de marbre) incorporées dans les mortiers.

L'utilisation de ces matériaux, couplés aux superplastifiants le « TEK-SUPERFLOW 2000 R » noté (SP1) et le « ORAFLOW THM 17200 » noté (SP2), a permis d'améliorer de façon significative la formulation des mortiers ainsi que leurs propriétés mécaniques.

Toutefois, plusieurs mortiers fluides destinés aux ouvrages horizontaux ont été étudiés à l'état frais et à l'état durci. Aussi, il été nécessaire pour nous de connaître les caractéristiques de ces additions minérales et leur action sur les propriétés des mortiers.

Mots clés : Mortier, Rhéologie, Viscosité, Superplastifiant, Fillers calcaires, Poudre de marbre, Ressuage.

ABSTRACT

The objective of this work is to contribute to understanding the main mechanisms of action of mineral additions (limestone fillers and marble powder) incorporated in mortars.

The use of these materials, coupled with the "TEK-SUPERFLOW 2000 R" superplasticizers noted (SP1) and the "ORAFLOW THM 17200" noted (SP2), significantly improved the formulation of the mortars and their properties mechanical.

However, several liquid mortars intended for horizontal structures were studied in the fresh state and in the cured state. Therefore, it was necessary for us to know the characteristics of these mineral additions and their action on the properties of mortars.

Key words: Mortar, Rheology, Viscosity, Superplasticizer, Limestone fillers, Marble powder, Penetrant testing.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو المساهمة في فهم الآليات الأساسية لعمل المضافات المعدنية (الحشو الحجر الجيري ومسحوق الرخام) تأسست في قذائف الهاون.

باستخدام هذه المواد، إلى جانب الملدنين "توك-SUPERFLOW 2000 R" المسمى (SP1) و " ORAFLOW THM 17200" المسمى (SP2)، ساعدت على تحسين كبير في صياغة قذائف الهاون وممتلكاتهم الميكانيكية.

و بذلك ، تمت دراسة عدة ملاط سائلة مخصّصة للهياكل الأفقية في الحالة الطازجة والمتصلدة. أيضا، كان من الضروري بالنسبة لنا أن نعرف خصائص هذه الإضافات المعدنية والعمل على خصائص الملاط.

كلمات البحث: الملاط ، دراسة الخواص الانسيابية، اللزوجة، الملدنات المضافة المعدنية ، مسحوق الرخام، توغل.

SOMMAIRE

RESUME

ABSTACT

LISTE DES TABLEAUX.....	1
LISTE DES FIGURES.....	2
INTRODUCTION GENERALE.....	6

CHAPITRE I : Notions de base sur la rhéologie

I.1 Introduction.....	9
I.2 Définitions.....	9
I.2.1 Contrainte de cisaillement T [Pa].....	9
I.2.2 Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ [s^{-1}].....	9
I.2.3 Seuil de cisaillement T_0 [Pa]	9
I.2.4 Viscosité [Pa.s].....	12
I.2.5 Concentration volumique	12
I.3 Types de comportements rhéologiques	13
I.3.1. Courbes d'écoulement linéaire.....	13
I.3.2. Courbes d'écoulement non linéaire	13
I.3.3. Fluides thixotropes	14
I.3.4. Précisions sur les comportements des fluides.....	15
I.4. Conclusion	17
I.5. Références	17

CHAPITRE II : Influence des fines minérales et des adjuvants sur le comportement rhéologique des matériaux cimentaires

II.1 Introduction	22
II.2 Additions organiques	22
II.2.1. Types des superplastifiants	22

II.2.1.1. Lignosulfonates modifiés (LSM).....	22
II.2.1.2. Polynaphtalènes sulfonates et polymélamines sulfonates	23
II.2.1.3. Superplastifiants à base de carboxylates (PC)	24
II.2.2. Action des superplastifiants sur les matériaux cimentaires...24	
II.2.2.1. Adsorption.....	24
II.2.2.2. Effet sur l'hydratation du ciment.....	26
II.2.2.3. Dispersion par effet stérique.....	28
II.2.3. Effets rhéologiques des superplastifiants.....	29
II.3. Influence des additions minérales.....	30
II.3.1. Types d'additions minérales.....	30
II.3.1.1. Fillers calcaires.....	30
II.3.1.2. Laitier granulé des hauts fourneaux.....	31
II.3.1.3. Pouzzolane naturelle.....	31
II.3.1.4 Fumée de silice.....	32
II.3.1.5. Cendres volantes.....	32
II.3.2. Action d'additions minérales sur les matériaux cimentaires.33	
II.3.2.1 Effet Granulaire.....	34
II.3.2.2 Effet physico-chimique et microstructural.....	37
II.3.2.3 Effet chimique.....	37
II.4. Effet des additions minérales sur la rhéologie.....	39
II.4.1. Effet du type de l'addition.....	39
II.4.2. Effet du taux de substitution.....	43
II.5. Ressuage.....	44
II.6. Références.....	45

CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux et méthodes utilisées

III.1. Caractérisation des matériaux.....	52
III.1.1. Le ciment.....	52
III.1.2. Les fillers calcaires.....	54
III.1.3. Le sable.....	54
III.1.3.1. Les caractéristiques physiques du sable.....	54
III.1.3.2. Analyse granulométrique.....	55

III.1.4. Les additions organiques.....	56
III.2. Composition des mortiers.....	57
III.3. Démarches méthodologiques.....	59
III.3.1. Essai du mini cône.....	59
III.3.2. Essai au rhéomètre	59
III.4. Différentes étapes d'un essai rhéologique.....	63
III.5. Mesure des paramètres rhéologiqueS.....	65
III.6. Essai de la résistance mécanique.....	66
III.6.1. Confection des éprouvettes prismatiques.....	66
III.6.2. Essais de compression et de traction par flexion.....	66
III.7. Essai du ressuage.....	68
III.8. Références.....	68

CHAPITRE IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction.....	71
IV.2. Compatibilité des superplastifiants avec les liants.....	71
IV.3. Les essais d'étalement.....	71
IV.3.1. Combinaisons entre les fillers calcaires et les Superplastifiants SP1 et SP2.....	71
IV.3.2. Combinaisons entre la poudre de marbre et les superplastifiants SP1 et SP2.....	73
IV.4. Le seuil de cisaillement.....	74
IV.4.1. Combinaisons entre les fillers calcaires et les superplastifiants SP1 et SP2.....	74
IV.4.2. Combinaisons entre la poudre de marbre et les superplastifiants SP1 et SP2.....	75
IV.5. La viscosité plastique.....	76
IV.5.1. Combinaisons entre les fillers calcaires et les superplastifiants SP1 et SP2.....	76
IV.5.2. Combinaisons entre la poudre de marbre et les superplastifiants SP1 et SP2.....	77
IV.5.3. Modèle rhéologique.....	79
IV.6. Le ressuage.....	80
IV.6.1. Combinaisons entre les fillers calcaires et les superplastifiants SP1 et SP2.....	80

IV.6.2. Combinaisons entre la poudre de marbre et les superplastifiants SP1 et SP2.....	80
IV.7. Les résistances.....	81
IV.7.1. Combinaisons entre les fillers calcaires et les superplastifiants SP1 et SP2.....	81
IV.7.2. Combinaisons entre la poudre de marbre et les superplastifiants SP1 et SP2.....	82
IV.8. Conclusion.....	83
IV.9. Références.....	84
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Modèles mathématiques (lois empiriques) caractérisant les différents écoulements.....	14
Tableau II.1 : Formulation du mortier autoplaçant.....	42
Tableau II.2 : Résistance du Mortier autoplaçant.....	42
Tableau II.3 : Propriétés du béton autoplaçant en présence des fillers calcaires.....	44
Tableau III.1 : Composition chimique du ciment (%) (SCIBS).....	52
Tableau III.2 : Composition minéralogique du ciment (%) (SCIBS).....	53
Tableau III.3 Propriétés physico – mécaniques du ciment (SCIBS).....	53
Tableau III.4 Composition chimique et minéralogique des fillers calcaires (%) (ELBAHI).....	54
Tableau III.5 : Caractéristiques physiques du sable.....	54
Tableau III.6 : Analyse granulométrique du sable.....	55
Tableau III.7 : Les compositions des différents mortiers du SP1.....	58
Tableau III.8 : Les compositions des différents mortiers du SP2.....	58
Tableau III.9 : Profil de vitesse adopté pour les essais rhéologiques sur mortier.....	62

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Relation entre les seuils de cisaillement statiques et dynamiques, Pour des pâtes de ciment avec et sans adjuvant et/ou additions	11
Figure I.2 : Variation du rapport du seuil statique sur le seuil dynamique, en fonction de la concentration volumique solide des suspensions	12
Figure I.3 : Comportements rhéologiques	14
Figure I.4 : Exemples des courbes d'écoulement	15
Figure I.5 : Illustration du calcul de la viscosité apparente pour des corps rhéoépaississants, sans et avec la présence d'un seuil de cisaillement....	17
Figure II.1 : Structure chimique des Lignosulfonates modifiés LSM	23
Figure II.2 : Structure chimique des polynaphtalènes sulfonates PNS	23
Figure II.3 : Structure chimique des polymélamines sulfonates PMS	23
Figure II.4 : Structure chimique des polycarboxylates PC	24
Figure II.5 : Isothermes d'adsorption d'un superplastifiant de type PNS sur les phases pures de ciment, eau/solide = 0,5 [François P. (2004)].....	25
Figure II.6 : Répulsion stériques selon plusieurs degrés d'adsorption a) Adsorption b) fixation des superplastifiants c) recouvrir les grains de ciments d) dispersion.....	29
Figure II.7 : Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologique des pâtes de ciment [Edwige Nicolas (2010)].....	30
Figure II.8 : Amélioration de la consistance d'un béton en fonction du % de fumée de silice ajoutée pour différentes valeurs du rapport eau/liant selon Kwan (2000).....	35

Figure II.9 : Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes 1 et 2 dans une formulation de béton selon Lewandowski (1983).....	35
Figure II.10 : Variation du besoin en eau des pâtes CEM II-addition à consistance normalisée en fonction de la teneur relative en addition [Karali, (2002)].....	36
Figure II.11 : Effets du type de l'addition minérale sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.....	40
Figure II.12 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la poudre de marbre et des superplastifiants	41
Figure II.13 : Variation de la viscosité en fonction de la poudre de marbre et des superplastifiants.....	41
Figure II.14 : Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant.....	43
Figure III.1 : Courbe granulométrique du sable.....	56
Figure III.2 : Illustration du mini cône.....	59
Figure III.3 : Dispositif de l'essai rhéologique.....	60
Figure III.4 : Evolution du couple et la vitesse de rotation en fonction du temps.....	61
Figure III.5 : Evaluation du couple en fonction de la vitesse.....	64
Figure III.6 : Evaluation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.....	64
Figure III.7 : Mortier partiellement et totalement cisailé.....	65
Figure III.8 : Eprouvettes prismatiques des mortiers.....	66

Figure III.9 : Dispositif d'essais d'écrasement.....	67
Figure III.10 : Dispositif de flexion 3 points.....	68
Figure IV.1 : Compatibilité des superplastifiants avec les liants.....	71
Figure IV.2 : Etalement des mortiers avec fillers calcaires.....	72
Figure IV.3 : Variation de l'étalement des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2.....	73
Figure IV.4 : Variation de l'étalement des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2.....	74
Figure IV.5 : Variation du seuil de cisaillement des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2.....	75
Figure IV.6 : Variation du seuil de cisaillement des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2.....	76
Figure IV.7 : Variation de la viscosité des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2.....	77
Figure IV.8 : Variation de la viscosité des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2.....	78
Figure IV.9 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement total.....	79
Figure IV.10 : Variation du ressuage des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2.....	80
Figure IV.11 : Variation du ressuage des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2.....	81
Figure IV.12 : Résistance à la compression des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2.....	82

Figure IV.13 : Résistance à la flexion des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2..... 82

Figure IV.14 : Résistance à la compression des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2..... 83

Figure IV.15 : Résistance à la flexion des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2..... 83

Introduction générale

De nos jours, l'accroissement du nombre de constituants dans les bétons (ciment, eau, granulats, addition(s) minérale(s) et adjuvant(s)) est, d'un point de vue pratique, très avantageux car il conduit à une plus grande souplesse de formulation, en permettant de fournir des solutions à des problèmes encore difficiles à résoudre pour des bétons de composition ternaire. Soulignons par exemple les effets bénéfiques des superplastifiants sur le comportement rhéologique ou encore ceux de certaines additions minérales sur les propriétés mécaniques.

Depuis plusieurs années, les études de la rhéologie des matériaux à matrice cimentaire se sont surtout attachées à élaborer ou à tenter de mettre en œuvre des tests empiriques pour caractériser l'aptitude à l'écoulement du béton. Ces travaux ont été entrepris suite à l'émergence des bétons autoplacants et au développement de nouvelles générations de superplastifiants.

Relativement peu d'études fondamentales traitant de l'effet des additions minérales sur la rhéologie des matrices cimentaires ont toutefois été menées, la majorité des travaux concernant surtout la comparaison des maniabilités des pâtes ou bétons contenant des additions. Pourtant, il reste encore beaucoup de points à élucider et à comprendre. En effet, il est encore difficile de connaître, à partir des seules propriétés d'un matériau nouveau, son effet sur le comportement du béton frais lorsqu'il est ou non couplé à un superplastifiant.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude du comportement rhéologique des mortiers ou une partie du ciment est substituée par deux types d'additions minérales (fillers calcaires et poudre de marbre). En plus, nous avons choisi de tester deux types de superplastifiants à savoir le « TEK-SUPERFLOW 2000 R » noté (SP1) et le « ORAFLOW THM

17200 » noté (SP2) afin d'évaluer l'effet de la combinaison additions organiques / additions minérales sur le comportement rhéologique et mécanique du mortier. Plusieurs mortiers fluides destinés aux ouvrages horizontaux seront étudiés à l'état frais et à l'état durci.

Ce mémoire comporte quatre 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 organiques sur le comportement rhéologique des matériaux cimentaires.

Le troisième chapitre concerne la caractérisation des matériaux et les méthodes d'essais utilisées.

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

Une conclusion générale regroupe les principaux résultats de cette étude ainsi que des perspectives.

Chapitre I

Notions de base sur la rhéologie

I.1. Introduction

Depuis plusieurs années, les études sur la rhéologie des matériaux cimentaires s'amplifient afin de caractériser correctement l'aptitude à l'écoulement du béton.

Ce genre de recherche a été encore plus motivé par l'arrivée de nouveaux matériaux tels que les bétons autoplaçants qui comportent dans sa formulation de nouveaux constituants comme des additions minérales ou organiques.

Ce chapitre fournit différents rappels et précisions sur les différentes notions de rhéologie utilisées dans ce travail.

I.2. Définitions

I.2.1. Contrainte de cisaillement τ [Pa]

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées de mouvement relatif les unes par rapport aux autres : deux couches successives, au contact l'une de l'autre, se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il en résulte l'apparition de contraintes qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche [Couarraze et Grossiord (1983)].

I.2.2. Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ [s⁻¹]

Souvent appelée *gradient de vitesse*, il s'agit de la vitesse de déformation de deux couches successives de matériau cisailé, qui représente donc la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement [Couarraze et Grossiord (1983)].

I.2.3. Seuil de cisaillement τ_0 [Pa]

C'est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le fluide s'écoule. Pour des contraintes plus faibles, le corps ne présente pas de déformation permanente et il se comporte comme un solide.

Les fluides ne possédant pas de seuil de cisaillement sont dits exclusivement visqueux; ceux qui en possèdent un sont dits viscoplastiques.

1.2.3.2 Différentes types de seuils

Il existe différentes méthodes de mesure du seuil de cisaillement (des résumés sont donnés par Dzuy et al. (1983) et Liddell et al. (1996)). Parmi celles-ci, deux sont intéressantes: la méthode scissométrique, et la méthode mathématique, généralement très répandue en génie civil.

Il s'avère que ces méthodes mènent à des réalités physiques très différentes. La première est pratiquée sur une suspension au repos. La mesure, effectuée sur une substance initialement structurée, correspond donc à la contrainte à fournir pour mettre la substance en mouvement ou pour obtenir la première évidence de son écoulement. Il s'agit donc d'un seuil de cisaillement au repos (ou appelé seuil statique par certains auteurs [Keating et al. (1989)]).

La seconde méthode est effectuée sur une suspension dont la structure a été partiellement détruite, c'est-à-dire qu'un degré de déstructuration maximum a été atteint pour le gradient de vitesse appliqué. Le seuil est obtenu par l'extrapolation de la courbe d'écoulement à une valeur τ_0 donnée par l'une des relations du *tableau I.1* Il s'agit alors d'un seuil qu'on peut qualifier de dynamique [Keating et al. (1989)]. Sa signification physique pourrait se rapporter à un arrêt ou au figeage du matériau fraîchement malaxé.

Notons que les deux grandeurs n'ont de chances d'être égales que pour des matériaux présentant peu d'effets temporels (thixotropie, réactivité). On peut d'ailleurs être tenté de les comparer, même si les phénomènes physiques sont fondamentalement différents. Dzuy et al. (1985) ont montré qu'elles peuvent présenter une certaine corrélation, ce qui est confirmé par nos résultats sur des pâtes de ciment avec et sans adjuvant et/ou additions (*figure I.1*).

Les seuils statiques sont généralement plus élevés que les seuils dynamiques (dans le premier cas, la structure est encore vierge de tout cisaillement), particulièrement dans le cas des suspensions ayant une forte concentration (*figure I.2*) [Cyr M. (1999)].

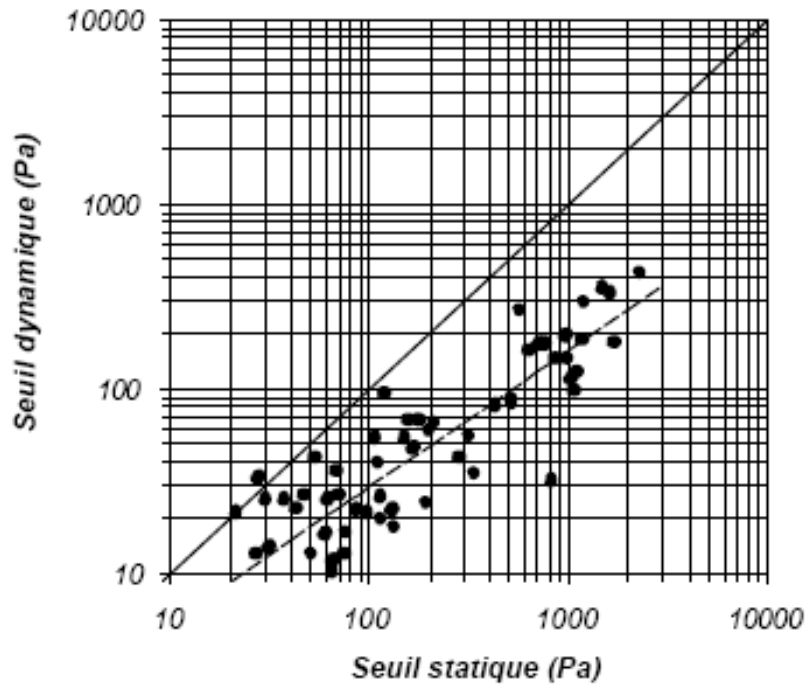


Figure I.1 : Relation entre les seuils de cisaillement statiques et dynamiques, Pour des pâtes de ciment avec et sans adjuvant et/ou additions [Cyr M. (1999)].

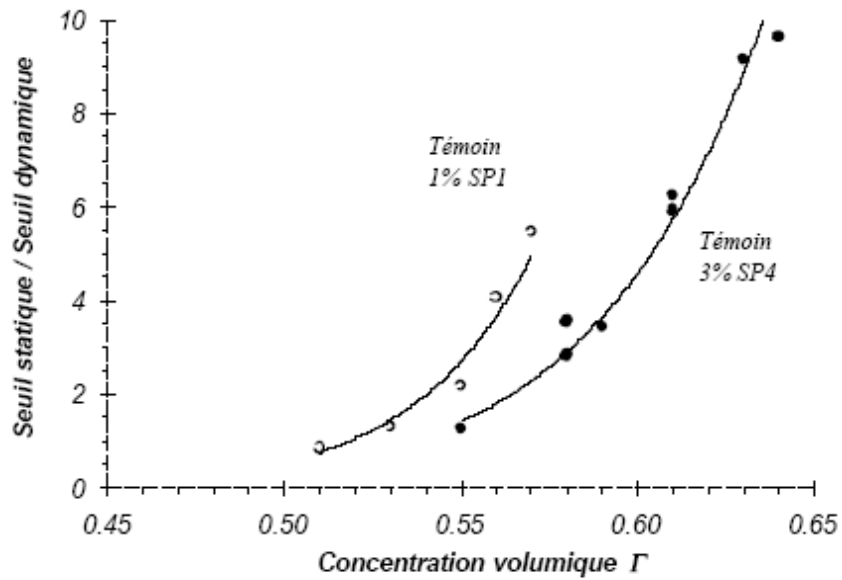


Figure I.2 : Variation du rapport du seuil statique sur le seuil dynamique, en fonction de la concentration volumique solide des suspensions [Cyr M. (1999)].

I.2.4. Viscosité [Pa.s]

Les coefficients de viscosité servent à caractériser le comportement rhéologique des matériaux. On en distingue plusieurs types, dont le principal est la viscosité dynamique ou apparente (μ), définie par la relation (I.1).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (I.1)$$

Sur une courbe d'écoulement $\tau - \dot{\gamma}$, la viscosité apparente est égale, pour un point donné de la courbe (donc une valeur de τ ou de $\dot{\gamma}$), à la pente de la droite joignant l'origine au point représentatif considéré.

I.2.5 Concentration volumique

Il est courant en rhéologie d'exprimer les concentrations en volume plutôt qu'en masse. On définit ainsi une concentration volumique solide Γ (relation (I.2)), qui peut être reliée aux rapports massiques E/C ou E/L , dans le cas d'une pâte de ciment additionnée de fines minérales, grâce aux relations (I.3) et (I.4).

$$\Gamma = \frac{V_s}{V_s + V_e} \quad (I.2)$$

où V_s et V_e sont respectivement les volumes de solide et d'eau.

En fonction de E/C
(Eau/Ciment)

$$\Gamma = \frac{X}{X + E/C} \quad \text{avec } X = \left(\frac{1}{d_c} + \frac{p}{(1-p)d_a} \right)$$

ou $E/C = \frac{X(1-\Gamma)}{\Gamma}$ (I.3)

En fonction de E/L
(Eau/Liant)

$$\Gamma = \frac{Y}{Y + E/L}$$

$$\text{ou } E/L = \frac{Y(1 - \Gamma)}{\Gamma}$$

$$\text{avec } Y = \left(\frac{1-p}{d_c} + \frac{p}{d_a} \right)$$
(I.4)

où p est le taux de substitution massique et d_c et d_a sont respectivement les densités du ciment et de l'addition.

I.3. Types de comportements rhéologiques

Les différents types d'écoulement, en régime permanent, sont généralement définis par leur rhéogrammes ($\tau, \dot{\gamma}$) aussi appelés courbes d'écoulement. La *figure I.3* illustre les différents types de courbes d'écoulement caractérisant les comportements rhéologiques des fluides. Le *tableau I.1* donne les principaux modèles utilisés comme approximation des courbes d'écoulement obtenues expérimentalement.

I.3.1. Courbes d'écoulement linéaires

On distingue dans cette catégorie des corps ayant un comportement exclusivement visqueux (l'écoulement se produit dès qu'il y a une contrainte de cisaillement) ou viscoplastique (l'écoulement ne se produit que lorsque les contraintes dépassent une valeur minimale, appelée seuil de cisaillement). Ils sont caractérisés par des équations simples (*tableau I.1*) : fluides newtoniens (courbe 1) et fluides de Bingham (courbe 2).

I.3.2. Courbes d'écoulement non linéaires

Il s'agit de corps complexes exclusivement visqueux ou viscoplastique, mais ayant des lois de comportement non linéaires. On retrouve dans cette catégorie les comportements rhéofluidifiants ($n < 1$), avec et sans seuil de cisaillement (courbe 3b et 3a), ainsi que les comportements rhéoépaississants ($n > 1$, courbe 4b et 4a). Ils sont souvent décrits par des modèles obéissant à des lois de puissance, la plus commune étant celle d'Herschel-Bulkley mais d'autres équations sont également employées (*tableau I.1*).

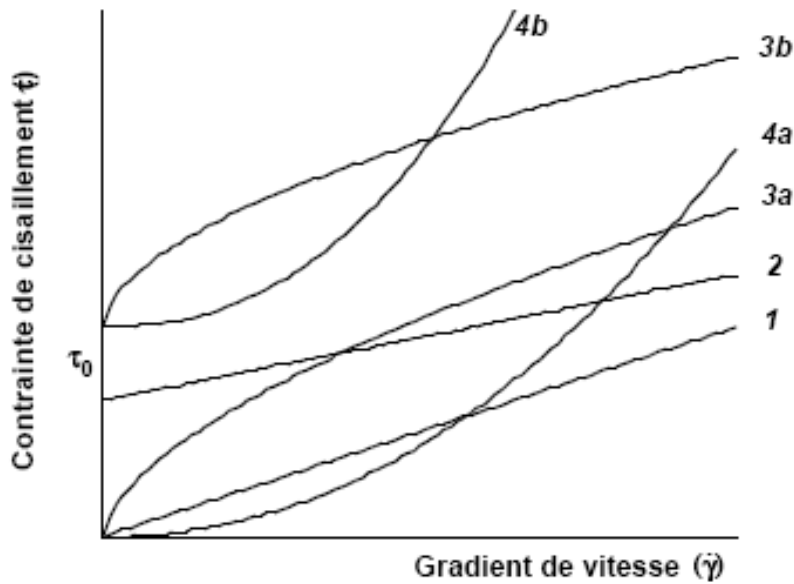


Figure I.3 : Comportements rhéologiques, (3a), (3b) : comportements rhéofluidifiants ; (4a), (4b) : comportements rhéoépaississants [Cyr M. (1999)].

Tableau I.1 : Modèles mathématiques (lois empiriques) caractérisant les différents écoulements

Modèles mathématiques (lois empiriques) caractérisant les différents écoulements			
Nom	Modèle	Nom	Modèle
Newtonien	$\tau = \mu \dot{\gamma}$	Bingham (1919, 1922)	$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$
Robertson-Stiff (1976)	$\tau = A(\dot{\gamma} + C)^B$	Herschel-Bulkley (1926)	$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$
Ellis (1927)	$\dot{\gamma} = K_1 \tau + K_2 \tau^n$	Casson (1959)	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{k \dot{\gamma}}$
Eyring (1936)	$\tau = \sum_{i=1}^n A \sinh^{-1}(\dot{\gamma} B_i)$ $\tau = A \dot{\gamma} + B \sinh^{-1}(\dot{\gamma} / C)$	Vom Berg (1979)	$\tau = \tau_0 + B \sinh^{-1}(\dot{\gamma} / C)$

I.3.3. Fluides thixotropes

Outre la variation des comportements provoquée par la réactivité des constituants (par exemple, l'hydratation des pâtes de ciment), certaines substances peuvent avoir un écoulement dont les caractéristiques dépendent du temps ou des traitements antérieurs.

C'est le cas des corps thixotropes, définis par une baisse réversible de la viscosité apparente lors d'une sollicitation à vitesse constante au cours du temps (l'effort nécessaire à l'écoulement diminue). Ce phénomène, généralement caractéristique des suspensions flocculées, traduit la destruction progressive de la structure au repos. Leurs rhéogrammes présentent une boucle d'hystérésis, c'est-à-dire que la courbe de montée en cisaillement ne coïncide pas avec celle de la descente.

Les pâtes de ciment ne sont pas des corps typiquement thixotropes puisque leur structure initiale ne se reforme jamais complètement (les courbes d'hystérésis ne se referment pas et ne passent pas au même endroit lorsqu'on répète l'essai). On peut alors définir le phénomène comme étant de la fausse-thixotropie [Legrand (1971)]. Ce phénomène a une forte tendance à diminuer avec l'utilisation de superplastifiants [Young (1982)].

La Figure I.4 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 I.4. La différence est due au comportement thixotropique du béton qui crée un retard dans la réponse du matériau [Roussel (2006)].

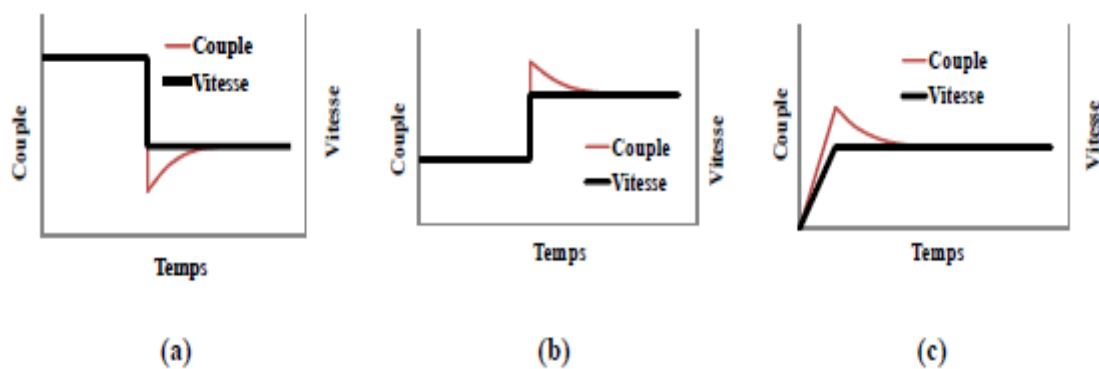


Figure I.4 : Exemples des courbes d'écoulement.

(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)].

I.3.4. Précisions sur les comportements des fluides

Il est courant de rencontrer dans la littérature, au lieu des courbes contraintes-gradients, des représentations graphiques donnant la variation

de la viscosité en fonction du gradient de vitesse. Suivant le type d'écoulement, on obtient différentes variations de la viscosité :

- fluides newtoniens : la viscosité apparente est constante (viscosité absolue). La plupart des fluides usuels (eau, huile, jus non concentré, lait...) sont des fluides newtoniens. Le fluide newtonien est décrit par la loi suivante :

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.5)$$

ou :

τ : la contrainte de cisaillement [Pa]

μ : la viscosité [Pa.s]

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

- fluides binghamiens : la viscosité apparente décroît lorsque $\dot{\gamma}$ augmente. La loi de comportement de Bingham s'écrit sous la forme suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.6)$$

ou :

τ : la contrainte de cisaillement [Pa]

μ : la viscosité [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.

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], [Beaupre, 1994], [Ferraris, 1998], [De Larrard, 2002], [Golaszewski, 2003], [Wallevik, 2006], [Estellé, 2008], [Lanos, 2009], [Choi, 2014], [Soualhi, 2014], [Adjoudj, 2015].

Une attention particulière doit être portée au cas des corps rhéoépaississants ayant un seuil de cisaillement non nul. En effet, on observe pour ces mélanges deux phénomènes inverses, illustrés à la *figure 1.5*. Pour de faibles gradients de vitesse, on assiste à une diminution de la viscosité apparente. Passé un certain gradient critique, on

obtient, pour de forts gradients de vitesse, une augmentation de la viscosité apparente, caractéristique des corps épaississants. Notons que cette diminution n'est pas observée lorsque le seuil de cisaillement du mélange est nul [Cyr M. (1999)].

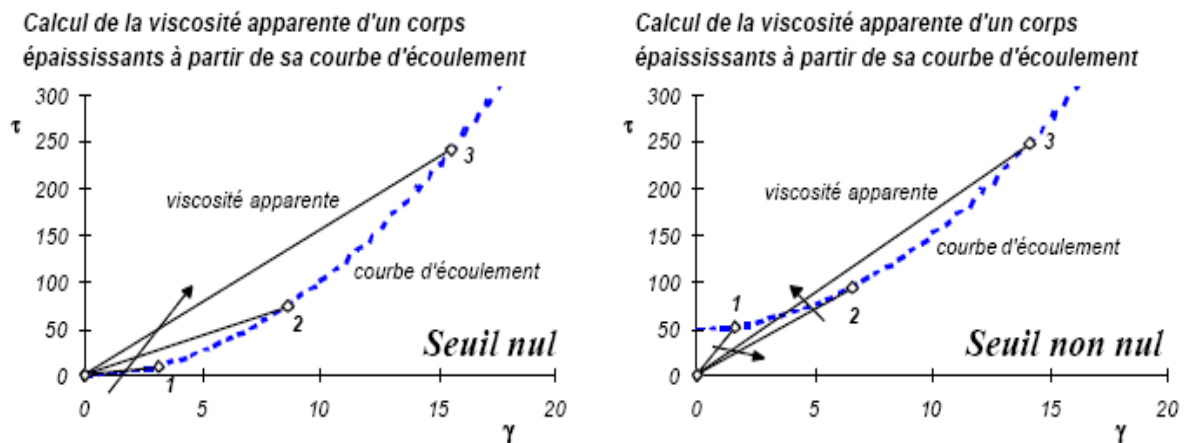


Figure 1.5 : Illustration du calcul de la viscosité apparente pour des corps rhéoépaississants, sans et avec la présence d'un seuil de cisaillement [Cyr M. (1999)].

La diminution de la viscosité apparente (aux faibles gradients) semble généralement interprétée dans la littérature comme le signe d'un comportement rhéofluidifiant. Or la courbe d'écoulement de ce type de mélange (figure 1.3, courbe 4b) ne montre pas de phase rhéofluidifiante comme celle de la courbe 3b.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre bibliographique nous avons mis en évidence la définition de la rhéologie. Ensuite, nous avons présenté quelques types de fluides et leurs notions de base. Aussi, nous avons définis les paramètres rhéologiques tels que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

I.5. Références

- Adjoudj M. (2015) « Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton ». Thèse de doctorat, soutenue en 2015, France, 161p.
- Barnes H.A. (1999) « The yield stress – a review or 'panta rei' – everything flows? », *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 81, pp.133-178.

- Barnes H.A. and Walters K. (1985) « The yield stress myth? », *Rheologica Acta*, 24, pp.323-326.
- Beaupré D. (1994) «Rheology of High Performance Shotcrete». PhD thesis, University of British Columbia, Canada.
- Choi M. (2014) «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.
- Couarraze G. and Grossiord J.L. (1983) *Initiation à la Rhéologie*, Lavoisier, Paris.
- Cyr M.(1999), *Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires*. Matériaux. INSA de Toulouse; Université de Sherbrooke.
- De Larrard F. and Sedran T. (2002) «Mixture-proportionning of highperformance concrete». *Cement and Concrete Research*. vol. 31(11), pp. 1699-1704, 2002. LCPC, « Pompage des bétons » Guide technique, Mars.
- Dzuy N.Q. and Boger D.V. (1983) « Yield stress measurement for concentrated suspensions », *Journal of Rheology*, 27 (4), pp.321-349.
- Dzuy N.Q. and Boger D.V. (1985) « Direct yield stress measurement with the vane method », *Journal of Rheology*, 29 (3), pp.335-347.
- Estellé P., Lanos C. et Duc T. P. (2008) « Caractérisation de l'écoulement du béton frais ». 43^{ème} colloque du Groupe Français de Rhéologie.
- Evans I.D. (1992) « Letter to the editor: On the nature of the yield stress», *Journal of Rheology*, 36 (7), pp.1313-1316.
- Ferraris C. and De Larrard F. (1998) «Testing and Modelling of FreshConcrete Rheology». NISTIR 6094, National Institute of Standards and Technology, p. 59 pages.

- Golaszewski J. and Szwabowski J. (2003) «Influence of superplasticizer on rheological behaviour of fresh cement mortars». *Cement and Concrete Research*. vol. 34(2), pp. 235-248.
- Herschel W.M. and Bulkley R. (1926) Measurement of Consistency as Applied to Rubber-Benzene Solutions, *Proc. Amer. Soc. Testing Materials*, 26 (II), pp.621-634.
- Keating J. and Hannant D.J. (1989) « The effect of rotation rate on gel strength and dynamic yield strength of thixotropic oil well cements measured using a shear vane », *Journal of Rheology*, 33 (7), pp.1011-1020.
- Lanos C., Estellé P. (2009) « Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais ». *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(4), pp. 457-471.
- Legrand C. (1971) « Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais», Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier, Toulouse.
- Liddell P.V. and Boger D.V. (1996) « Yield stress measurements with the vane », *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 63, pp.235-261.
- Roussel N. (2006) «A theoretical frame to study stability of fresh concrete». *Materials and Structures*, vol. 39, pp. 81-91.
- Shaughnessy R.S. and Clark P.E. (1988) The rheological behavior of fresh cement pastes, *Cement & Concrete Research*, 18 (3), pp.327-341.
- Soualhi H. (2014) « Optimisation de la viscosité des bétons à faible impact environnemental ». Thèse de doctorat, soutenue en 2014, France, 166p.
- Struble L.J. (1991) The Rheology of Fresh Cement Paste, *Proceedings of the Conference on Advances in Cementitious Materials (July 22-26, 1990) - Ceramic Transactions*, 16, pp.7-29.
- Tattersall G.H. and Banfill P.F.G. (1983) *The Rheology of Fresh Concrete*, Pitman, pp.254-305.

- Tattersall G. (1990) Application of rheological measurements to practical control of concrete. Liverpool.
- Vom Berg W. (1979) Influence of Specific Surface and Concentration of Solids upon the Flow Behavior of Cement Pastes, Magazine of Concrete Research, 31 (109), pp.211-216.
- Wallevik J. (2006) «Relationship between the Bingham parameters and slump». Cement and Concrete Research, vol. 36(7), pp. 1214-1221.
- Young F. (1982) « Effect of chemical admixtures on the rheological properties of fresh concrete », Materials Research Society, Symposium M, Ed. J. Skalny.

Chapitre II

Influence des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique des matériaux cimentaires

II.1. Introduction

L'incorporation des additions minérales et organiques conduit, généralement, à la réduction de la quantité d'eau nécessaire au gâchage et à l'augmentation conséquente de la compacité du matériau.

Ce chapitre présente un état de l'art sur l'influence de ces nouveaux matériaux sur le comportement rhéologique des matériaux cimentaires.

II.2. Additions organiques

Les adjuvants sont des substances organiques (superplastifiants, plastifiants-réducteurs, fluidifiants, entraîneur d'air) ou inorganiques (accélérateur de prise et de durcissement) qui permettent de modifier la rhéologie des bétons avec des faibles teneurs en eau. De plus, ils permettent d'accélérer ou de retarder la prise, selon les exigences du chantier. De ce fait, ces adjuvants peuvent être considérés comme des constituants du béton au même titre que les éléments de base tels que le ciment, les granulats, le sable et l'eau de gâchage.

II.2.1. Types des superplastifiants

Les superplastifiants sont présentés en quatre groupes classés en deux catégories selon la nature du groupement anionique. La première catégorie des polymères est composée des polymères contenant des fonctions sulfonate (SO_3^-) et la deuxième catégorie est munie de fonctions carboxylate (COO^-) [Anderson P.J. et al., (1987)].

II.2.1.1. Lignosulfonates modifiés (LSM)

Les lignosulfonates représentent les premiers adjuvants organiques apparus dès 1932. Ce sont des polyélectrolytes qui dispersent la suspension par effet purement électrostatique [Mesli et Charif (2016)]. Leur structure chimique est représentée à la figure II.1.

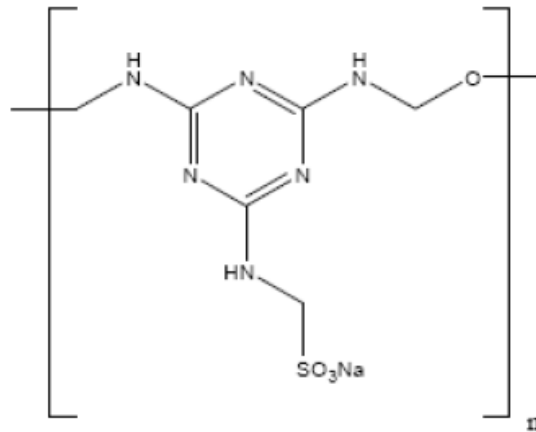


Figure II.1 : Structure chimique des Lignosulfonates modifiés LSM

II.2.1.2. Polynaphtalènes sulfonates (PNS) et polymélamines sulfonates (PMS)

Pendant plus de trente ans, l'industrie du béton s'est satisfaite de ces réducteurs d'eau, jusqu'à ce que les Japonais et les Allemands mettent sur le marché des produits de synthèse aux propriétés dispersantes beaucoup plus efficaces que les lignosulfonates de l'époque. Ces nouveaux produits développés en 1960 sont les sels sulfoniques de condensé de formaldéhyde et de naphthalène (produit japonais) PNS ou de mélamine (produit allemand) PMS. Les PNS et les PMS sont également des polymères organiques, linéaires et anioniques avec des groupements polaires sulfonates (SO_3^-) qui disperse la suspension par effet purement électrostatique. Leurs structures chimiques sont représentées respectivement sur les figures II.2 et II.3.

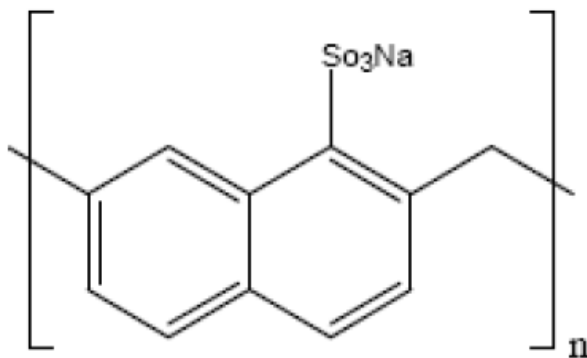


Figure II.2 : Structure chimique des polynaphtalènes sulfonates PNS

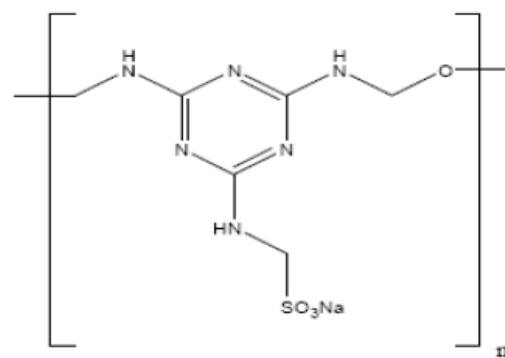
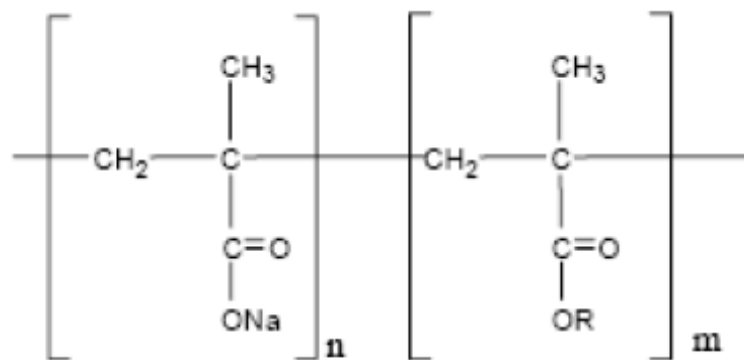


Figure II.3 : Structure chimique des polymélamines sulfonates PMS

II.2.1.3. Superplastifiants à base de carboxylates (PC)

En 1980, l'apparition des polycarboxylates nommés PC est une grande évolution des super réducteurs d'eau. Ils ont été mis au point après les polysulfonates et sont pour cette raison communément appelés superplastifiants de nouvelle génération. Ils sont formés d'une combinaison de polymères dont le mécanisme de dispersion se fait par une répulsion combinée électrostatique et stérique. Leur structure chimique est représentée sur la figure II.4.



R=oxyde d'éthylène par exemple

Figure II.4 : Structure chimique des polycarboxylates PC

II.2.2. Action des superplastifiants sur les matériaux cimentaires

II.2.2.1. Adsorption

Les superplastifiants sont généralement introduits dans l'eau de gâchage avant le mélange avec le ciment. Au moment où les grains de ciment entrent en contact avec l'eau, les molécules du superplastifiant participent à la saturation des charges de surface au même titre que les autres ions présents en solution.

Yoshioka et *al.*, (2002) ont également étudié l'adsorption de 04 types de superplastifiants sur les différentes phases pures. Ils ont montré qu'une plus grande quantité de polymère s'adsorbait sur les phases aluminates (C_3A et C_4AF) que sur les phases silicates (C_3S et C_2S). De même, l'isotherme d'adsorption d'un PNS sur le C_3A , C_4AF et C_2S synthétisés montre que les quantités saturées d'adsorption sur le C_3A et le C_4AF

étaient très élevés, environ 300 mg/g, tandis que celle sur le C_3S n'était que de 2 mg/g [Nawa T. et al., (1992)]. D'autres travaux avec de l'acide salicylique ont confirmé que la quantité d'adsorption sur les différents minéraux de ciment étaient dans l'ordre de $C_3A > C_4AF > C_3S$ [Blank B. et al. (1963)]. La figure II.5 présente les résultats [François P. (2004)] d'adsorption d'un superplastifiant de type PNS sur les phases pures de ciment (C_3A , C_4AF et C_3S) pour des rapports eau/solide de 0,5. Ces résultats montrent que le polymère s'adsorbe préférentiellement sur les phases aluminates et peu sur les phases silicates.

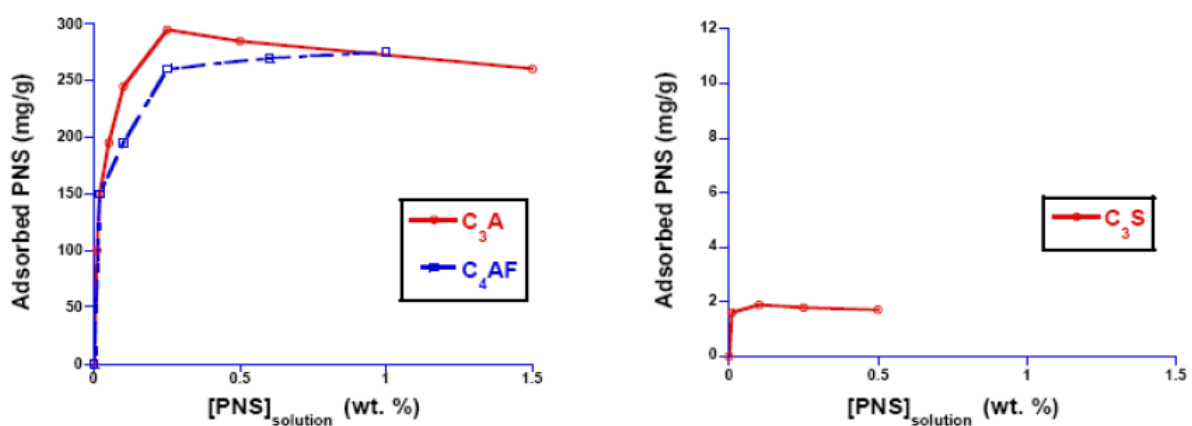


Figure II.5 : Isothermes d'adsorption d'un superplastifiant de type PNS sur les phases pures de ciment, eau/solide = 0,5 [François P. (2004)].

Il a été constaté que la viscosité des pâtes de ciment augmente sensiblement dans le ciment ayant un faible rapport de C_3S/C_2S ou de C_3A/C_4AF , surtout lorsqu'un superplastifiant de type PNS est employé [Blank B. et al., (1963)]. Cette étude montre que la teneur en C_3A et la finesse de ciment sont les facteurs les plus influents sur le comportement rhéologiques des pâtes de ciments. Plus la teneur en C_3A et la finesse de ciment sont élevées, plus l'effet de fluidification du superplastifiant diminue [Uchikawa H., (1992)]. Ces résultats ont été confirmés par Boragafio et al. (1992) en comparant les propriétés rhéologiques de trois types de ciment d'où l'effet de fluidification diminue lorsque le rapport $C_3A/CaSO_4$ augmente. De plus, l'action des superplastifiants devient plus importante lorsque la taille des particules de ciment est inférieure à 10 μm [Hattori K. (1976)]. Cet effet sur les particules fines a également été étudié par [Nawa et al., (1992)] où la viscosité des pâtes de ciment accrue avec la fraction fine ($\leq 10 \text{ nm}$) de ciment. Cela est dû à l'augmentation du montant de superplastifiant adsorbé lorsque la finesse du ciment augmente.

II.2.2.2. Effet sur l'hydratation du ciment

Il a été constaté que les molécules de superplastifiant dispersent non seulement des particules de ciment, mais sont impliqués dans l'hydratation, ce qui conduit à des modifications de la morphologie des hydrates. Baussant [Baussant J.B. (1990)] observait, en l'absence de superplastifiant, que l'ettringite a été trouvé bien cristallisé alors que lors de la présence de superplastifiant de type PNS, l'ettringite a été modifiée selon une forme sphéroïdale. En outre, plus le poids moléculaire du PNS est élevé, plus la dimension des cristaux est petite [Baussant J.B. (1990)]. De même, la chaleur d'hydratation initiale diminue avec la présence de PNS à faible poids moléculaire, alors que les travaux de Jolicoeur et *al.* (1994) prouvent que la chaleur d'hydratation initiale n'est pas modifiée par l'addition d'un PNS ayant un poids moléculaire plus que 100 kilodalton.

Des résultats de recherche ont montré que le superplastifiant de type sulphonates a la capacité à s'intercaler dans les phases du monosulfoaluminate AFm du ciment pur [Feron V. (1994)].

La couche du AFm formée autour du ciment augmente la surface que doit recouvrir le superplastifiant pour disperser les grains ce qui engendre une augmentation du dosage en superplastifiant [Leroux F. et al. (2004)]. De même, des phases lamellaires intercalées par des polymères de type PC sont observables au microscope électronique à transmission, et que des distances basales de 2 à 4 nm sont mesurées par DRX, en fonction de la longueur des greffons [Plank J. et al. (2006)].

a) Effet sur l'hydratation du silicate tricalcique

L'intérêt de l'étude de l'influence des adjuvants sur l'hydratation du silicate tricalcique se justifie aisément lorsque l'on rappelle que cette phase est d'une part la phase la plus abondante dans un ciment et que d'autre part elle est à l'origine des propriétés mécaniques de la pâte durcie. Il est alors assez clair que toute action sur cette hydratation est susceptible de modifier à la fois les propriétés du béton frais liées à l'avancement de l'hydratation des phases constituant le ciment mais également les propriétés du béton durci.

Il est bien établi que l'utilisation de superplastifiant permet un gain de résistances mécaniques du fait de la réduction d'eau [Henning O., Goretzki

I. (1982)]. La plupart des travaux relatifs à l'influence des superplastifiants sont en fait réalisés sur des ciments. Ainsi, mêmes si un certain nombre de chercheurs [Kim B.J. (2000)] évoquent l'action de ce type d'additif sur l'hydratation du silicate tricalcique, ils s'attachent pour la plupart à remarquer un effet retardateur sur l'hydratation.

La littérature est ainsi relativement abondante concernant les PNS et l'influence de leur masse molaire sur la cinétique d'hydratation des phases silicatées. Anderson et *al.* (1988) mentionnent une amélioration des propriétés rhéologiques du béton avec l'augmentation de la masse moléculaire du superplastifiant. Différents travaux [Kim B.J. (2000)], [Page M. et al. (2000)] mentionnent qu'en présence de PNS, l'hydratation initiale est plus rapide par rapport au béton non adjuvanté, cette observation serait liée à l'effet dispersant de ce type de molécule sur les grains de ciment qui favorise le contact ciment-eau.

b) Effet sur l'hydratation de l'aluminate tricalcique

L'hydratation de l'aluminate tricalcique présente d'importantes particularités aux conséquences non négligeables. Son hydratation est en effet plus rapide que celle du silicate tricalcique et par conséquent sa réactivité sera en partie à l'origine des propriétés d'usage du ciment au jeune âge et notamment de son ouvrabilité que l'on cherche à contrôler par l'addition des superplastifiants. En employant un superplastifiant, le C_3A et C_4AF exercent l'affinité la plus élevée pour adsorber ces superplastifiants. Comme le C_3A est la phase de ciment qui s'hydrate le plus rapidement, elle représente la phase la plus importante pour des interactions de ciment-superplastifiant. En fait, l'analyse d'eau interstitielle a prouvé que les ciments riches en C_3A consomment un grand nombre de polymères supplémentaires de superplastifiant dans les premières minutes d'hydratation de ciment [Bonon D. et al. (1995), Young J.F. (1972)].

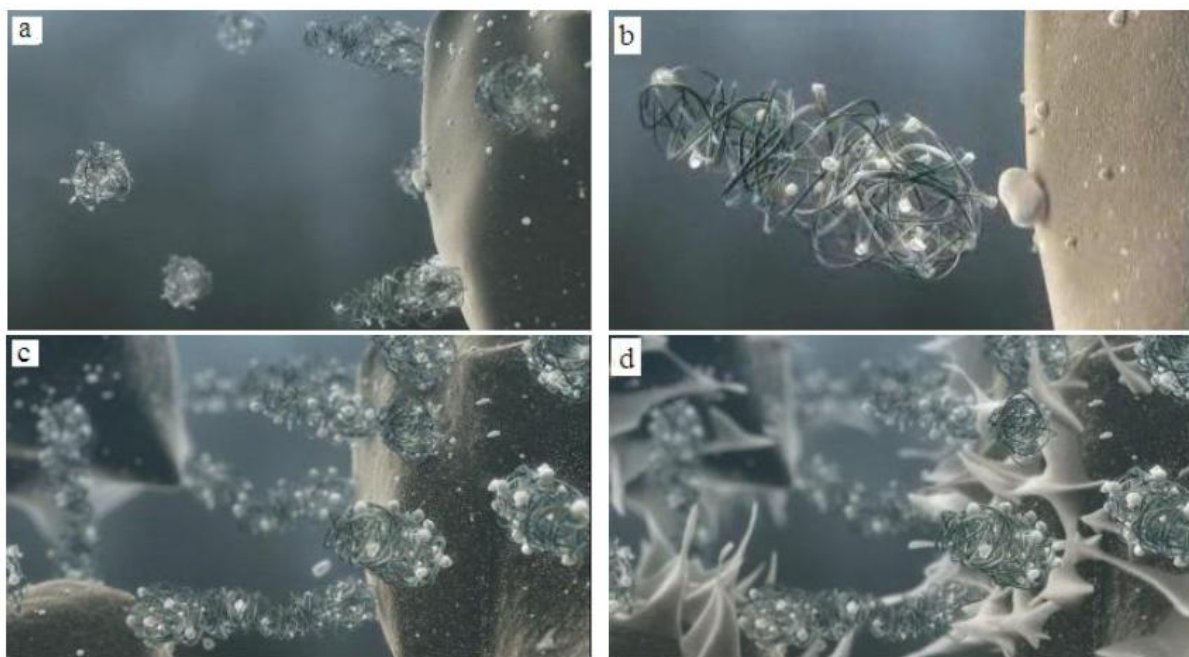
L'examen de la littérature laisse apparaître des points de vue différents sur l'effet des superplastifiants sur l'hydratation du C_3A . En effet, si l'ensemble des chercheurs sont d'accord sur le fait que les superplastifiants modifient la morphologie des hydrates et de l'ettringite en particulier [Hekal E.E. et al. (1999), Afridi M.U.K. et al. (1994)], en revanche, les opinions divergent concernant l'effet des superplastifiants sur la cinétique d'hydratation. Sakai (1980) et Simard (1993) affirment ainsi que les superplastifiants de type PNS ou PC entraînent une diminution de la vitesse de formation de l'ettringite liée à leur forte adsorption à la surface des grains de ciment. Alors que Odler et *al.* (1980) affirment une accélération de la vitesse de formation d'ettringite en

présence de PNS. D'autre part, Collepari et al. (1980) observent que la présence de PNS ne modifie pas la cinétique d'hydratation du C_3A . L'incorporation des superplastifiants aux produits initiaux d'hydratation a un effet négatif sur leur réactivité, car la moindre présence de superplastifiant peut modifier la cinétique d'hydratation. D'ailleurs, de divers superplastifiants se sont avérés être différemment adsorbés par le même ciment [Feron V. (1997)].

II.2.2.3. Dispersion par effet stérique

L'effet stérique apparaît quand les molécules adsorbées forment une structure multicouche autour des particules où elles ne peuvent pas physiquement s'approcher très étroitement comme illustré sur la figure II.6. A ce propos, beaucoup de chercheurs ont essayé de clarifier l'importance relative des forces électrostatiques et stériques en dispersant les particules de ciment. Selon les résultats de Neubauer et al. (1998), la dispersion des grains de ciment observée est principalement due aux répulsions stériques; cette répulsion s'explique par la difficulté pour les chaînes de polymères de s'enchevêtrer lorsque les particules s'approchent. Cela résulte de la perte d'entropie engendrée lorsque les chaînes s'entremêlent et de la pression osmotique créée par l'augmentation de la concentration en polymères entre deux particules. Les molécules de superplastifiants constituent alors des barrières physiques entre les particules pour empêcher la coagulation. Une augmentation de l'épaisseur de la couche adsorbée et de la densité des chaînes des polymères améliore la dispersion. Ainsi, les polymères de grande masse moléculaire accentuent la répulsion stérique.

Les forces répulsives stériques induites par des molécules de superplastifiant sont également importantes comme mécanisme de dispersion [Banfill PFG. (1979)]. Plus récemment, l'importance relative des effets électrostatiques et stériques a été considérée dans la répulsion de particule-particule par [Uchikawa et al. (1997)]. Leurs conclusions sont que les forces électrostatiques jouent un rôle important dans le mécanisme de dispersion pour des superplastifiants de type PNS et PMS tandis que les forces stériques sont critiques pour un superplastifiant de type PC.



*Figure II.6 : Répulsion stériques selon plusieurs degrés d'adsorption
 a) Adsorption b) fixation des superplastifiants c) recouvrir les grains de ciments
 d) dispersion*

II.2.3. Effets rhéologiques des superplastifiants

En l'absence de superplastifiants, les particules de ciment s'agglomèrent en raison des charges opposées présentes à leur surface. Ce phénomène va se traduire par un seuil d'écoulement au niveau des propriétés rhéologiques. En présence de superplastifiants, les polymères organiques vont limiter l'agglomération des grains, ce qui aura pour conséquence une diminution voire une suppression du seuil d'écoulement. De plus, lors de la dispersion des particules, la structure floculée va se dissoudre et l'eau retenue à l'intérieur va être libérée, de telle façon qu'elle pourra à nouveau contribuer à l'écoulement. La figure II.7 reprend les effets des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques d'une pâte de ciment [Edwige Nicolas (2010)].

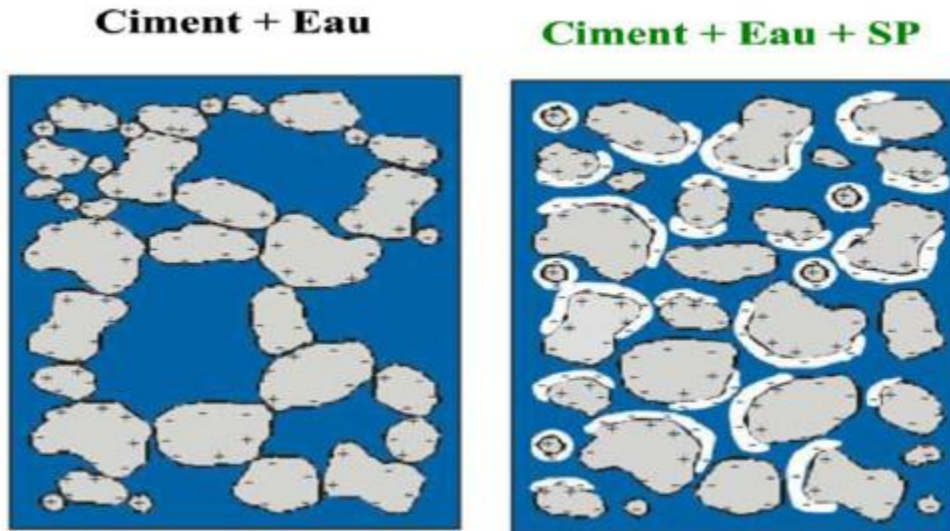


Figure II.7: Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologique des pâtes de ciment [Edwige Nicolas (2010)]

II.3. Influence des additions minérales

Les substances minérales utilisées comme ajouts en cimenterie ou additifs lors de la confection du béton contribuent par leur activité physique, hydraulique et pouzzolaniques à améliorer le comportement des ciments à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

II.3.1. Types d`additions minérales

Matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Il existe deux types d'additions minérales : les additions quasiment inertes (type I) et les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent (type II).

II.3.1.1. Fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Ils sont actuellement classés comme additions de type I par la nouvelle norme européenne EN 206-1.

Les fillers calcaires peuvent exister dans les granulats et notamment le sable produit par concassage.

Les fillers calcaires sont parmi les additions des plus utiliser dans les BAP [Bilberg P. (1999)], La présence de ces derniers dans les bétons

autoplaçants conduit à un béton avec des pores plus fines que ceux des bétons ordinaires, de ce fait, le mélange sera plus compact et donne une meilleure fluidité avec une viscosité réduite [Benkechkech et al. (2009)], comme elles augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP à l'état frais [Nehdi et al. (2001)], et réduisent la tendance à la ségrégation selon [Barrak (2005)].

II.3.1.2. Laitier granulé des hauts fourneaux

Le laitier des hauts fourneaux est un sous produit des usines sidérurgiques formé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une fois sorti du four, il 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. L'utilisation de ce sous produit date de plus d'une centaine d'années où on enregistra la première production d'un ciment au laitier en Allemagne (1892) puis aux USA (1896). Cependant, son utilisation a rencontré des difficultés à cause des faibles résistances engendrées. Progressivement, cette inquiétude a disparu grâce à une optimisation entre les propriétés chimiques, le taux de verre et l'activité, ce qui a rendu le ciment au laitier très répandu aujourd'hui. Son utilisation en cimenterie s'est étendue à travers le monde à cause de ses performances mécaniques, de son économie et de sa valeur écologique.

II.3.1.3. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques [basaltiques](#) ou de composition proche. Elle possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement [rouge](#) ou [noire](#), avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement [grise](#).

Sous la [Rome antique](#), la pouzzolane est mélangée à la chaux aérienne, permettant à ces mortiers la prise hydraulique, durcir en présence d'eau. [Louis Vicat](#) expliquera les principes de cette réaction, dans sa théorie de l'[hydraulicité](#) au XIX^e siècle. Le XIX^e siècle donnera le nom de pouzzolane à toutes substances (naturelles ou artificielles) capables de conférer à une chaux ou un ciment, son hydraulicité. Autrement dit, la « propriété pouzzolanique » est l'aptitude d'un matériau à se combiner à température ambiante et en présence d'eau avec la [chaux](#) ou la [portlandite](#) pour donner des hydrates très peu solubles.

II.3.1.4 Fumée de silice

La fumée de silice condensée depuis les années 1980, réputée d'améliorer les propriétés du béton, comme additif, en complément de cendre volante silico-alumineuse ; Ses particules très fines s'insèrent entre les agrégats du ciment et le rendent plus compact et à certaines conditions plus dur, mais avec des avantages et des inconvénients ; des tests techniques normés ont en effet montré que :

- Mélangée au ciment portland, au laitier et à d'autres ajouts réactifs (poudre de quartz broyé, sable fin, fibres métalliques) dans les bétons dits « *bétons de poudres réactives* » (BPR) elle rend le béton plus imperméable aux agents chimiques agressifs en rendant la microstructure de la matrice cimentaire plus dense. Sa qualité dépend de ses propriétés physicochimiques : « densité, granularité, aire superficielle spécifique, activité pouzzolanique » ;
- La fumée de silice améliore effectivement la tenue à la chaleur des bétons THP (par rapport à un béton ordinaire) ;
- Avec ou sans superplastifiant les bétons en contenant ne sont pas nécessairement de meilleure qualité sans entrainement d'air, ou au moins sont « plus susceptibles à la fissuration interne causée par des cycles rapide de gel-dégel dans l'eau », mais que « souvent l'utilisation de fumée de silice décroît l'écaillage en surface des éprouvettes d'essais », ce qui montre que « la fissuration interne et l'écaillage sont deux formes différentes de dommages causés par le gel-dégel dans l'eau ».

C'est donc un des composants de bétons spéciaux par exemple utilisés en bord de mer (meilleure résistance du à l'insolubilité au sel) ou dans les centrales nucléaires (meilleure résistance à la chaleur).

II.3.1.5. Cendres volantes

Les cendres volantes sont de fines particules résultant de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Leurs particules ont une forme sphérique avec un diamètre allant de 1 à 150 μm . En 1937, Davis de l'Université de Californie présenta une étude sur l'utilisation des cendres volantes en cimenterie. En 1948, la construction du barrage de Hungry Horse aux USA fut la première application pratique. Depuis, les études se sont multipliées et l'utilisation de ses cendres s'est énormément répandue

grâce aux améliorations apportées au béton et à l'économie enregistrée par leur emploi.

L'utilisation des cendres volantes dans le béton permet d'atteindre plusieurs objectifs :

- Réduire la quantité de ciment utilisée et donc diminuer les coûts ;
- Réduire la chaleur d'hydratation ;
- Améliorer la maniabilité du béton ;
- Améliorer l'acquisition des performances mécaniques à long terme ;
- Améliorer la durabilité.

Deux voies sont employées pour les incorporer au béton :

- Utiliser un mélange de ciment aux cendres volantes ;
- Utiliser les cendres en tant que composant supplémentaire du béton, c'est à dire en tant qu'additions de type II.

II.3.2. Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires

La norme européenne EN 206-1 (NF P 18-325) de février 2002 définit des additions comme des (matériaux minéraux finement divisés utilisés dans le béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières).

L'action des additions concerne aussi bien l'état frais que l'état durci de béton. En premier lieu, à l'état frais, la présence des additions modifie la structure de squelette granulaire de matériau et les frictions entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide. En second lieu, au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment et peuvent modifier la structuration des produits hydratés. En troisième lieu, certaines additions ont la capacité de réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant additionnel à celui résultant de l'hydratation du ciment et que les anglo-saxons précisent sous le terme de (supplementary cementitious materials). De plus, ces différents aspects de l'action des additions peuvent intervenir de manière simultanée rendant particulièrement difficile l'évaluation de la contribution des additions

minérales aux performances des matériaux cimentaires. Toutefois, pour une première analyse de l'action des additions minérales, nous pouvons distinguer trois principaux effets que nous développons par la suite :

- un effet granulaire agissant sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais,
- un effet de la prise du durcissement,
- un effet physico-chimique et microstructural agissant sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement,
- un effet chimique agissant également au cours de l'hydratation du ciment et interagissant fortement avec l'effet physico-chimique et microstructural.

II.3.2.1 Effet Granulaire

L'effet granulaire concerne toutes les modifications induites par la présence de particules fines ou ultrafines au sein du squelette solide du mélange cimentaire frais en présence d'eau et éventuellement d'adjuvant. D'une part, ces modifications résultent de la capacité d'empilement des particules de l'addition avec les autres grains solides du mélange et d'autre part, de l'intensité des frictions entre les particules de l'addition et les autres grains solides du mélange. Ainsi, l'effet granulaire agit dès le malaxage sur toutes les étapes de la mise en œuvre des matériaux cimentaire avec additions (le transport, la mise en place et le serrage) et influe sur la densité du squelette granulaire ainsi que sur la capacité d'écoulement et la stabilité des mélanges frais.

Lorsque les particules des additions modifient peu les frictions intergranulaires dans les mélanges cimentaires, l'effet granulaire peut avoir des conséquences favorables dans la mesure où les particules des additions parviennent à remplir les porosités du squelette granulaire (ciment et granulats), et à libérer l'eau habituellement contenue dans les espaces intergranulaires. Cet arrangement favorable optimisé conduit, soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais du moment que la quantité d'eau reste constante (figure II.8), soit à la réduction de la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance donnée (figure II.9). Dans l'hypothèse où la quantité d'eau est diminuée, la compacité du mélange et ses performances mécaniques sont améliorées.

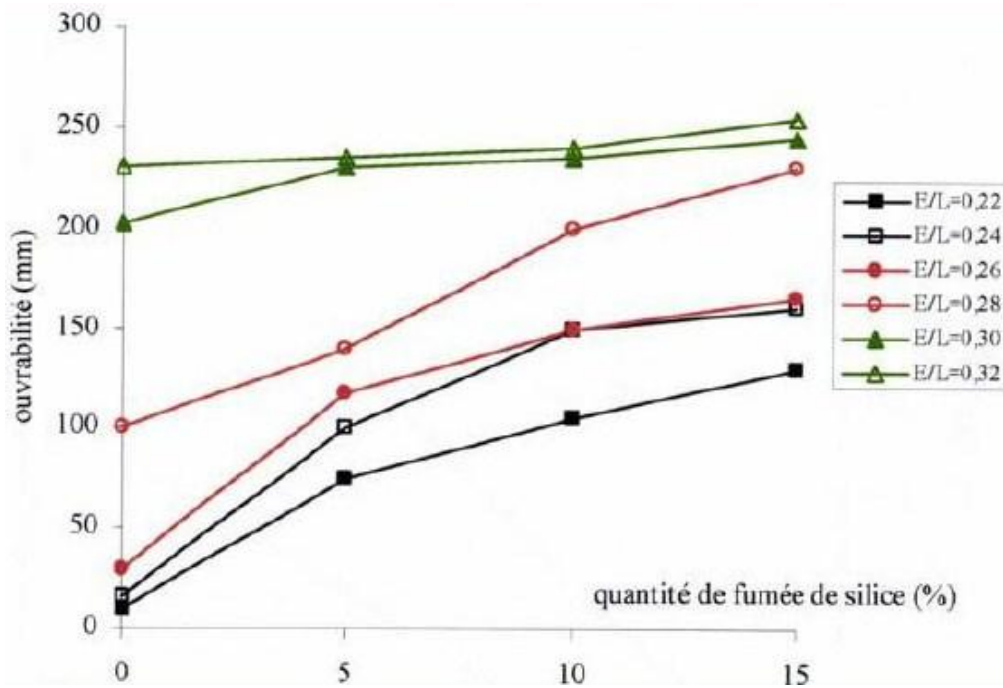


Figure II.8: Amélioration de la consistance d'un béton en fonction du % de fumée de silice ajoutée pour différentes valeurs du rapport eau/liant selon Kwan (2000).

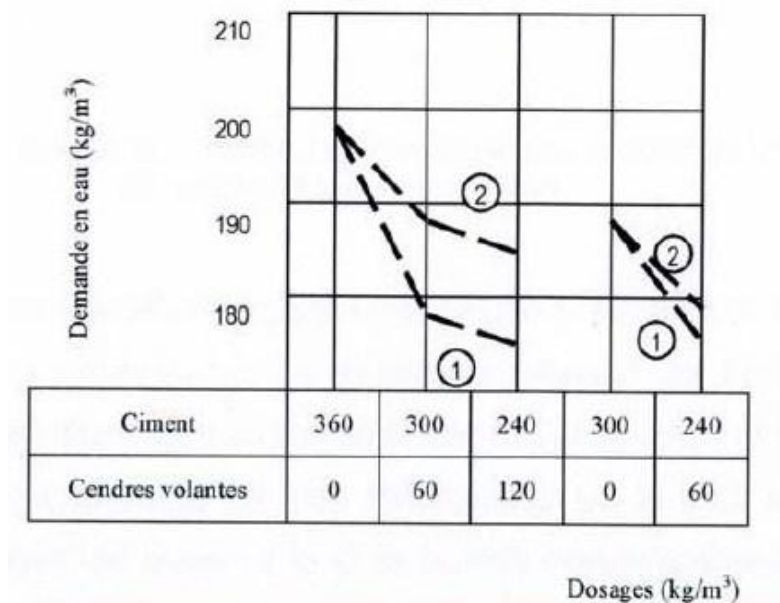


Figure II.9: Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes 1 et 2 dans une formulation de béton selon Lewandowski (1983).

Plusieurs études [Kara-Ali, (2002)] [Baron J. et al. (1997)] [Lawrence P. (2000)] [Kronlof A. (1994)] montrent en effet l'existence d'une optimisation des propriétés du squelette granulaire par l'incorporation d'additions minérales de nature et de quantité choisies.

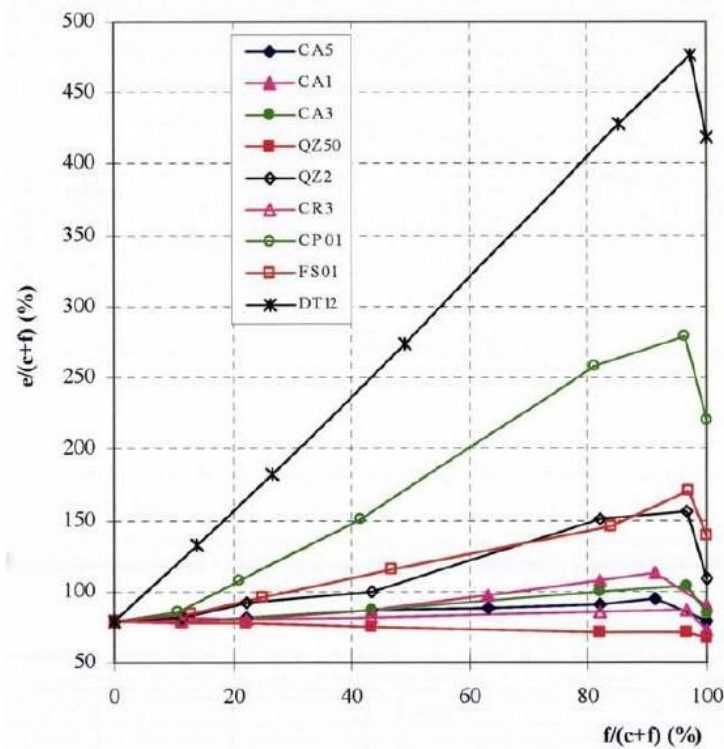


Figure II.10: Variation du besoin en eau des pâtes CEM II-addition à consistance normalisée en fonction de la teneur relative en addition [Kara-ali, (2002)].

En revanche, lorsque les particules des additions modifient considérablement les frictions intergranulaires dans les mélanges cimentaires ou ne parviennent pas à remplir les pores du squelette granulaire, l'effet granulaire peut avoir des conséquences défavorables. Kara-Ali (2002) a montré que dans le cas des additions dont les particules sont de forme irrégulière, la compacité du squelette granulaire diminue au fur et à mesure de l'introduction des additions. Il a aussi démontré (figure II.10) que l'introduction des additions à très forte teneur dans des pâtes cimentaires à consistance normalisée engendre un besoin en eau significativement plus élevé que celui attendu sur la base du besoin en eau propre du ciment et de l'addition. Le maximum du besoin en eau est atteint aux environs de 85-95% de substitution du ciment quelle que soit l'addition minérale concernée.

A l'analyse de ces différents résultats, force est de constater que l'effet granulaire des additions, qu'il soit favorable ou défavorable, influe sur le serrage des particules dans le squelette granulaire et, par voie de conséquence, influe sur le processus d'hydratation du ciment ainsi que sur le développement et l'intensité des effets physico-chimique, microstructural et chimique des additions minérales.

II.3.2.2 Effet physico-chimique et microstructural

L'effet physico-chimique et microstructural concerne les modifications induites par la présence des particules d'additions minérales dur le processus d'hydratation du ciment et sur la structuration des produits hydratés. Il n'est plus à démontrer [Feldman R. et al. (1985)] [(Guttridge W. et al. (1990)] [Neville A. (2000)] [Kara-ali, (2002)], que les additions jouent le rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions d'hydratation du ciment, permettant une meilleure répartition des produits hydratés et conduisant ainsi à une structuration plus efficace de la matrice cimentaire. Pour les additions calcaires, par exemple, il semble que la présence de carbonate de calcium (CaCO_3) favoriserait l'hydratation du C_3S dès les premiers instants et ceci d'autant plus que les particules sont fines et que la quantité de CaCO_3 est grande (jusqu'à 15 à 20% en masse) [Caré S. et al. (2000)] [Jiang S. (1996)]. Quant aux additions siliceuses, les particules de quartz, par exemple, pourraient constituer des sites préférentiels de nucléation en particulier pour la cristallisation des cristaux de portlandite [Benezet J. et al. (1999)].

Ainsi la présence de l'addition provoque une accélération des réactions d'hydratation du ciment, ceci d'autant plus que les particules sont fines [Caré S. et al. (2000)]. Toutefois, cet effet tend à devenir négligeable après 28 jours [Husson S. (1991)].

Il en résulte que l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges et sur les propriétés physique et microstructurales des matériaux cimentaires durcis.

II.3.2.3 Effet chimique

L'effet chimique concerne la capacité des additions, caractérisées par des propriétés pouzzolaniques, et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui contribuent à la résistance mécanique au même titre que les produits hydratés du ciment. Cet effet bénéfique est fonction de nombreux paramètres et peut se manifester à différents âges en fonction de la composition chimique ou minéralogique de l'addition, de sa surface spécifique et type de ciment.

La réaction pouzzolanique concerne principalement les fumées de silice, les cendres volantes siliceuses (classe F), les pouzzolanes naturelles ou les schistes calcinés. La silice amorphe présente dans ces différentes

additions réagit, en présence d'eau, avec la portlandite formé durant l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés C-S-H suivant la réaction suivante :



En pratique $x \approx 1,15$ [Waller V. (1999)].

Il faut noter que les particules les plus fines du quarts (considérées a priori comme inertes en milieu cimentaire) dont le diamètre à $5 \mu\text{m}$ peuvent également présenter une activité pouzzolanique similaire.

Par ailleurs, pour les additions calcaires, la calcite (CaCO_3) réagit avec les aluminates du ciment (C_3A , C_4AH_{13}) en présence d'eau pour former un mono-carboaluminate de calcium hydraté du type $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$, cristallisant en fines plaquettes hexagonales [Ollivier J. (1997)].

L'activité hydraulique concerne plus particulièrement les laitiers de haut fourneau et les cendres volantes calciques (classe C) qui, en raison du caractère basique du milieu cimentaire, peuvent produire des C-S-H dont le rapport C/s diffère de celui des C-S-H issus de la réaction pouzzolanique.

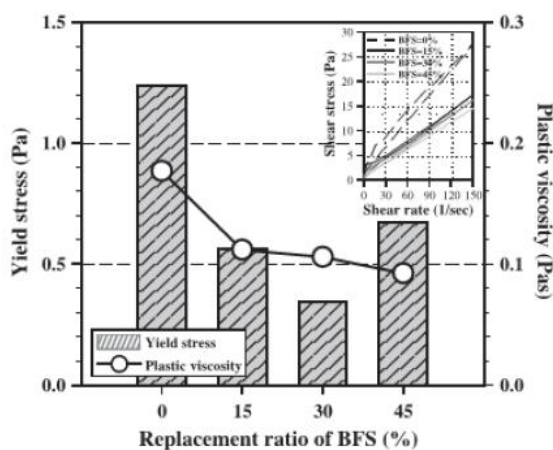
Toutefois, certaines additions peuvent présenter un effet chimique défavorable. En effet, il est rapporté que certaines cendres volantes peuvent avoir un effet retardateur de l'ordre d'une ou plusieurs heures sur la prise du ciment, probablement en raison de la libération de sulfates (SO_4) présente à la surface des particules de cendres volantes. Ainsi, seul le début de prise est décalé, l'intervalle de temps entre la prise et le durcissement restant inchangé. Ce retard peut être avantageux dans le cas d'un bétonnage par temps chaud ; dans le cas contraire il peut être nécessaire d'utiliser un accélérateur de prise [Neville A. (2000)].

Il en résulte que l'effet chimique, lorsqu'il est favorable, est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. son action sur les propriétés du matériau durci se mesure par la modification du volume et de la nature des produits hydratés formés. Néanmoins, leur forte synergie empêche toute distinction claire entre ces deux effets. Pour cette raison, ces deux effets peuvent être associés dans une notion unique plus large qui est celle de la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment.

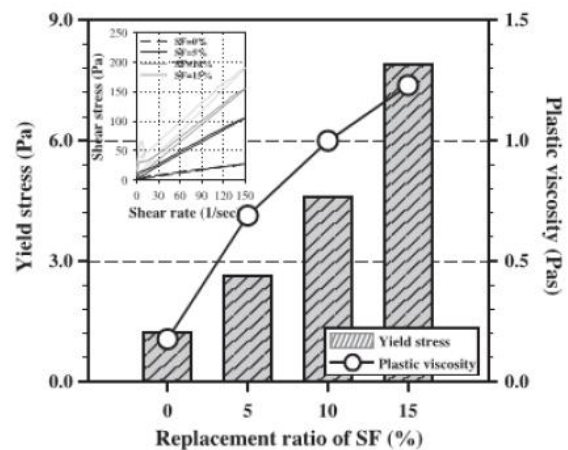
II.4. Effet des additions minérales sur la rhéologie

II.4.1. Effet du type de l'addition

L'incorporation de fumée de silice rend parfois le béton collant, bien que les avis soient partagés sur cet aspect. Pour certains auteurs, elle augmente le seuil de cisaillement et la viscosité tout en améliorant la compacité des mélanges. En revanche, Carlsward et *al.* (2003), constatent que la fumée de silice ne modifie pas la viscosité par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence. Dans le même sens, Ferraris et *al.* (2001), montrent que l'utilisation de la fumée de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou bien pour des bétons. Selon les résultats d'Aitcin et *al.* (1990), la viscosité augmente rapidement en fonction du dosage en fumée de silice sans l'utilisation de superplastifiant. Park et *al.* (2005) ont montré, en étudiant les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires contenant des additions minérales en utilisant le rhéomètre, que dans les mélanges ciment-additions de fumée de silice, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique augmentent en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'addition (figure II.11).



a) laitier



b) Fumée de silice

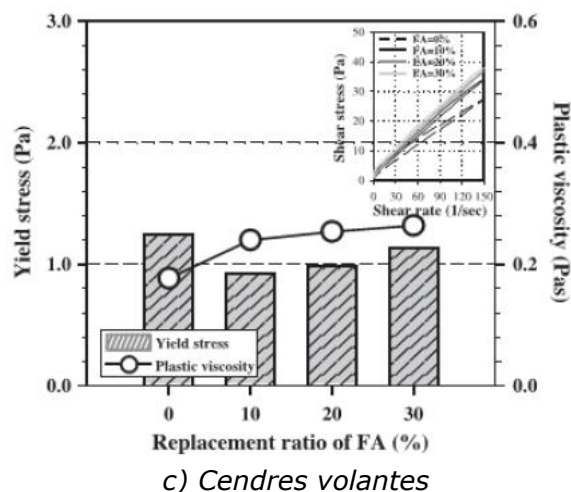


Figure II.11 : Effets du type de l'addition minérale sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.

Le filler calcaire semble avoir une faible influence sur la demande en eau, et peut conduire à une légère diminution de la viscosité du mélange cimentaire. Ceci peut justifier l'utilisation de cette addition à des dosages élevés dans la formulation des bétons (BAP et BHP). Cependant, plusieurs auteurs ont remarqué que, pour un dosage constant en ciment (ou un rapport E/C constant), l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer la viscosité d'une pâte de ciment (malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides), avant de provoquer une augmentation de la viscosité lorsque son dosage dépasse une certaine valeur critique, qui dépend du rapport E/C.

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

Mesli et Charif (2016) ont montré que le superplastifiant à base de poly carboxylates est plus efficace que le superplastifiant à base d'éther poly carboxylique pour réduire le seuil de cisaillement (Figure II.12). Par ailleurs, il apparaît à partir des résultats trouvés que les seuils de cisaillement des mortiers avec poudre de marbre sont les plus faibles par rapport à ceux confectionnés avec la pouzzolane naturelle ou les fillers calcaires.

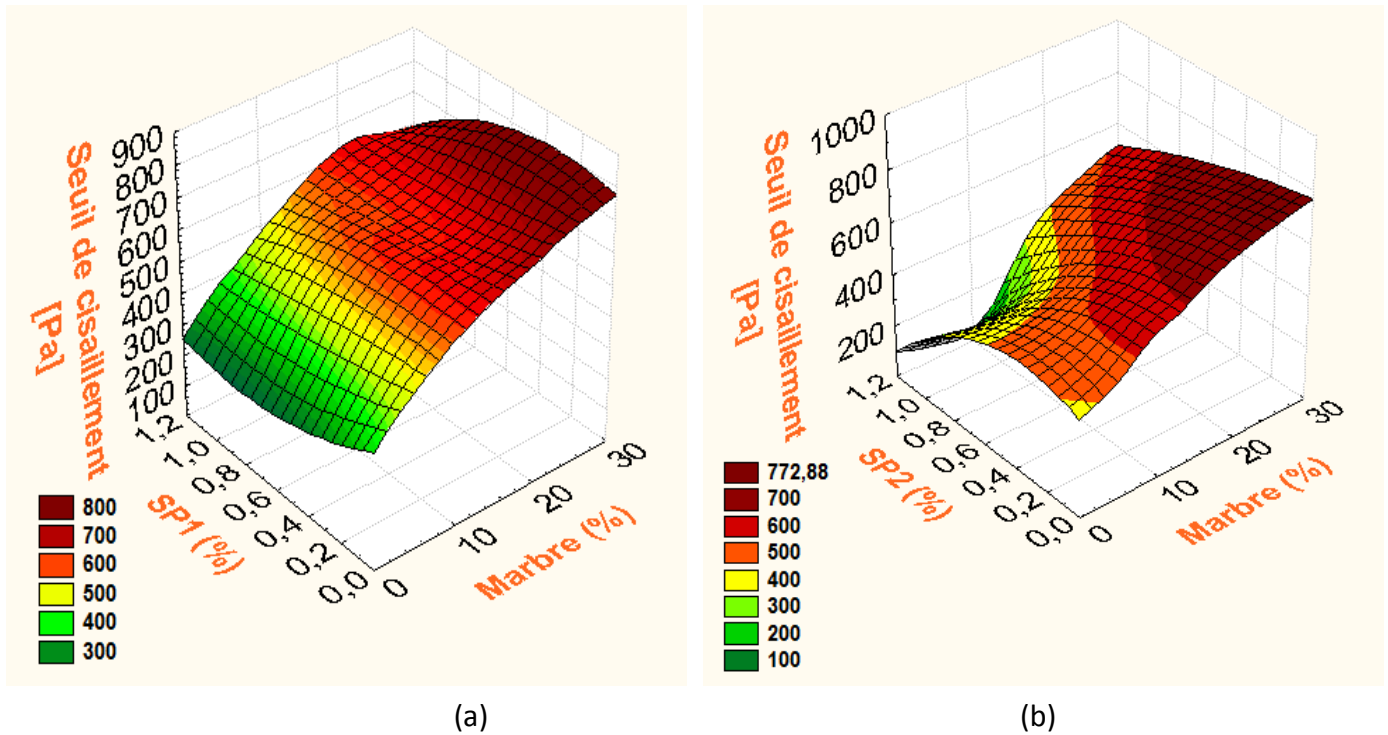


Figure II.12 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la poudre de marbre et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate [Mesli et Charif (2016)]

Mesli et Charif (2016) ont montré aussi que les viscosités deviennent plus élevées lorsque la poudre de marbre est employée avec le superplastifiant à base d'éther poly carboxylique (Figure II.13). 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.

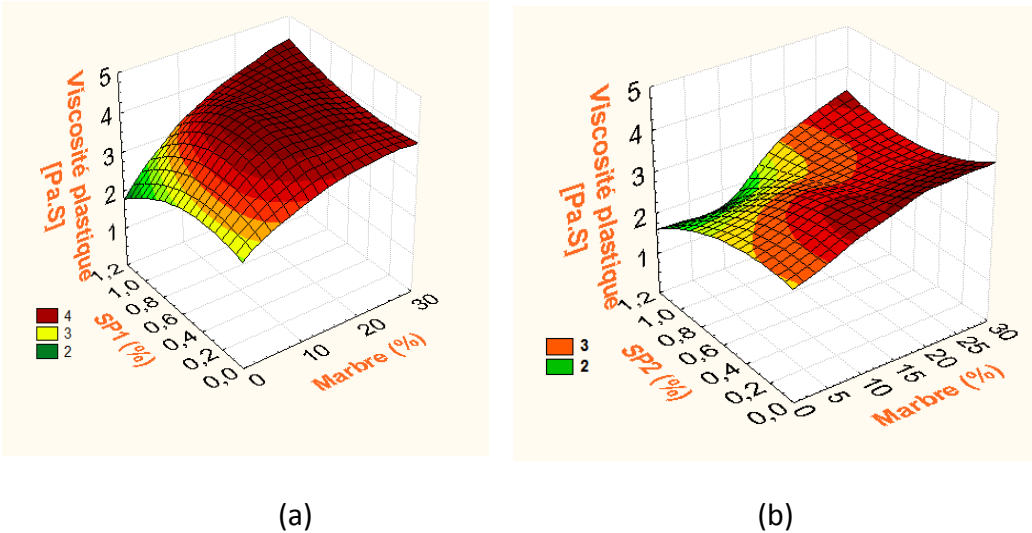


Figure II.13 : Variation de la viscosité en fonction de la poudre de marbre et des superplastifiants (a) avec éther poly carboxylique (b) avec polycarboxylate

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

[Taleb et col. (2012)] ont confectionné un mortier autoplaçant pour les chapes en préconisant un rapport de mélange ciment / sable = 1/4 avec une limite inférieure de 1/3 et une limite supérieure de 1/4,5 (BSI, 2004), ils ont effectué une série d'essais. La formulation présentée dans le tableau 2 a permis de répondre aux critères recherchés à l'état frais et aux critères de résistance à l'écrasement.

Tableau II.1 : Formulation du mortier autoplaçant [Taleb et col. (2012)]

Ciment	Sable fin	Sable grossier	Gravier 3/8	Gravier 8/16	Eau	E/C	Sp	Etal.	% laitance
400	400	1200	00	00	300	0,75	1,50%	630	1,70

Concernant les mortiers autoplaçant, les résultats ont clairement fait sortir que les chapes à base de mortier nécessitent un rapport E/C élevé vu la quantité des fines relativement importante dans le mélange. Les résultats rejoignent ceux de certains auteurs qui utilisent un rapport E/L au voisinage de 0,8 [Georgin et al. (2008)].

D'un autre côté, la résistance n'est pas très affectée par ce rapport E/C élevée. Ceci est du à la densité du mélange qui augmente d'un côté, et à l'absence des fissures qui se produisent généralement à l'interface entre la pâte et les granulats d'un autre côté (vu qu'il n'y a pas de gravier). La résistance à la compression devient donc contrôlée par la résistance de la pâte et la résistance de l'interface pâte granulats. Cependant, la résistance au cisaillement du béton risque d'être affectée.

Afin de déterminer la résistance en compression d'un mortier de chape, il importe d'effectuer un essai de flexion et de compression selon la norme EN 13892-2, sur des éprouvettes de 40 × 40 × 160 mm³ préparées conformément à la norme EN 13892-1.

Tableau II.2 : Résistance du Mortier autoplaçant [Taleb et col. (2012)]

Résistance à la compression à 7 jours	Résistance à la flexion à 7 jours
22,3 MPa	81,56 bars.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants si on se base sur quelques documents de référence comme le NIT 189 du CSTC et les STS 44 qui imposent une résistance en compression de 22,5 MPa pour les chapes à base de ciment.

II.4.2. Effet du taux de substitution

Pour la fabrication des bétons de hautes résistances et auto-compactants, la figure II.14 montre que l'ouvrabilité d'un béton augmente avec le pourcentage de fumée de silice pour un rapport eau/liant constant. Lorsque les fillers calcaires sont ajoutés au béton, les propriétés rhéologiques résultant sont liées à la quantité incorporée. Le tableau II.3 illustre les résultats de différents tests sur des bétons autoplaçants où après un certain seuil la dégradation des comportements rhéologique est significative [Beeralingegowda B. et al. (2013)]. De même, les tests effectués par Shen (2009) dans le laboratoire LGC, ont conduit à trouver une fourchette d'étalement de 34 à 36 cm pour le mortier constitué du CEM I 52,5R.

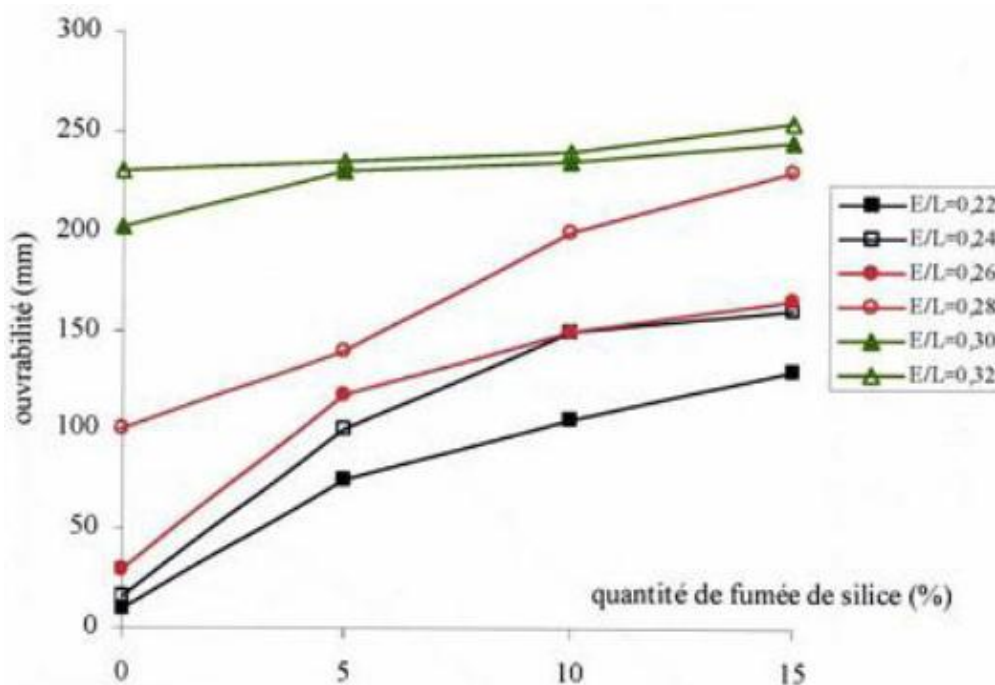


Figure II.14 : Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant

Tableau II.3 : *Propriétés du béton autoplaçant en présence des fillers calcaires*

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

II.5. Ressuage

Le ressuage est une forme de ségrégation du mortier frais. On entend par ressuage ou séparation et rejet d'eau, la propriété de sédimentation du mortier frais entre le moment du compactage et le début de prise. En raison de cette sédimentation, une quantité d'eau importante est amenée à la surface, surtout lorsque le rapport E/C est élevé, ce phénomène se manifestant aussitôt après la mise en place du matériau et jusqu'au début de la prise.

Ce tassement a pour résultat une contraction du mortier sur lui-même que l'on assimile à un retrait. La mesure de la quantité d'eau ressuée est une bonne indication de ce type de retrait. Il génère une détérioration de l'homogénéité du mortier, étant donné que l'eau de gâchage refoulée contient de fines particules de ciment et de sable. La solution aqueuse constituée de ciment et « d'eau de ressuage » stagne à la surface. La réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium dissous, cette eau et le dioxyde de carbone contenu dans l'air, provoque un dépôt calcaire à la surface (carbonatation). A cause de ce phénomène, il peut également subsister des poches d'eau entre le support et le mortier. Le ressuage dépend, non seulement de la composition du mortier, de sa fabrication, de sa mise en œuvre mais également de la géométrie des composants et des conditions environnantes [LAKHDARI (2015)].

II.5. Références

- Afridi MUK., Chaudhary ZU., Demura K., Iqbal MZ., "Effects of polymer modification on the formation of high sulfoaluminate or ettringite-type AFt crystals in polymer-modified mortars". Cement and concrete research, vol 24(8), 1994, pp.1492-94.
- Aïtcin PC., "Les Superplastifiants : des Réducteurs d'eau pas comme les autres", Recueil de conférences présentées à l'Université de Sherbrooke, 1990.
- Anderson PJ., Roy DM., Gaidis, JM., "The effect of adsorption of superplastifiant on the surface of cement", Cement and concrete research, vol. 17, 1987, pp. 805-113.
- Anderson PJ., Roy DM., "The effect of superplasticizer molecular weight on its adsorption on, and dispersion of cement", Cement and concrete research, vol. 18, 1988, pp. 980-6.
- 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.
- Baron J.P., Les bétons, bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, 1997.
- Baussant JB., "Nouvelle méthode de la formation d'hydrates des ciments- Application à l'analyse de l'effet d'adjuvants organiques", Thèse de Doctorat, Université Franche-Comité, France ; 1990, n 156, 194p.
- Beeralingegowda B., Gundakalle VD., "The effect of addition of limestone powder on the properties of self compacting concrete", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, vol 2(9), 2013, pp. 2319-8753.
- Benezet J.C. and Benhassaine A., The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder, powder Technology, vol. 103, pp. 26-29, 1999.

- Billberg P., "*Fine mortar rheology in mix design of SCC*". Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC, p47-58, 13-14 September 1999, Stockholm, Sweden.
- Blank B., Rossington D.R., Weinland JR, L.A., "*Adsorption of admixtures on portland cement*", Journal of the American Ceramic Society, vol. 46, 1963, pp. 395-399.
- Bonen D., Sarkar SL., "*The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss*", Cement and concrete research, vol. 25(7), 1995, pp. 1423-34.
- Boragafio JR., Macias A., "*Rheological properties of cement pastes containing different organic dispersants* ", Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cements, New Delhi IV, 1992, pp.557-563.
- Caré S., Linder R., Baroghel-Bouny V., De Larrard F. et Charonnat Y., Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des bétons – Plan d'expérience et analyse statique, LCPC, Ouvrage d'art OA 33, 102 pages, février 2000.
- Carlsward J., Emborg M., Utsi S., Oberg P., "*Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete*", Proceeding of the Third international RILEM conference on SCC, Island, Proceedings PRO 33, pp. 143-153,2003.
- Edwige Nicolas .Compatibilité et incompatibilité liants cimentaire/superplastifiant, thèse de doctorat en chimie du solide, université du Luxembourg.2010.
- Feldman R. F. and Cheng-GI M., Hydrations reactions in Portland cement silica-fume blends, cement and concrete Research, vol. 15, pp. 585-592, 1985.
- Fernon V., "*Étude de nouveaux solides lamellaire obtenus par corécipitation d'hydrate aluminocalcique et de sulfonate aromatique*", Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, France, 1994, 233p.

- Ferraris CF., Obla KH., Hill R., *"Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and Rheological properties of cementitious materials containing mineral concrete"*, Cement and concrete research, vol 31,2001,pp. 245-55.
- François P., *"Adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciment"*, Thèse de doctorat a l'École Polytechnique Fédérale de Lauzanne , 2004, 320p.
- Georjgin J.F., Ambroise J. Péra J., Reynouard J.M., 2008, « Development of self leveling screed based on calcium sulfoaluminate cement : Modelling of curling due to drying", Cement & Concrete Composites 30 769 – 778.
- Gutteridge W.A. and Daziel J.A., Filler cement : the effect of the secondary component on the hydration of Portland cement, Cement and concrete Research, vol. 20, n° 5, pp. 778-782, 1990.
- Hattori K., "Concrete journal", Japan, vol. 14 (3), 1976, pp.12-19.
- Hekal EE. and Kishar EA., *"Effect of sodium salt of naphthalene-formaldehyde polycondensate on ettringite formation"*. Cement and concrete research, vol. 29, 1999, pp.1535-40.
- Henning O., Goretzki I., *"Effect of plasticizers on the degree of hydration"*, RILEM Int.Conf. Concrete at Early age, Assn.Amicales des ingénieur, Paris, 1982, 151-155p.
- Husson S., Etude physic-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers: application aux mortiers, Thèse de l'école Normale supérieure des mines de Saint-Etienne, 1991.
- Jiang S. and Van Damme H., Influence des fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C3S, Rapport de CRMD-ATILH, Université d'Orléans, 1996.
- Jolicoeur C., Nkinamubanzi P.C., Simard M.A., Piote M., *"Progress in understanding the functional properties of superplasticizer in fresh concrete"*, In 4th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Montreal, 1994, SP 148-4, pp 63-88.

- Kara-Ali R., Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires, Thèse de doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2002.
- Kim B.J., "The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste", Cement and concrete research, vol. 30, 2000, pp. 887-93.
- Kronofol A., Effect of very fine aggregate on concrete strength, Materials and structures, vol. 27, pp. 225-230, 1989.
- Kwan A. K. H., Use of condensed silica fume for making high-strength, self-consolidating concrete, Canadian journal of Civil Engineering, vol. 27, pp. 620-627, 2000.
- Lakhdari. S. effets des adjuvants fluidifiants sur les caractéristiques physico-mécaniques et rhéologiques des mortiers à base de sables de carrières
- Leroux F., Gachon J., and Besse J.P., "Biopolymer immobilization during the crystalline growth of layered double hydroxide", Journal of Solid State Chemistry vol. 177(1), 2004, pp. 245-250.
- Lewandowski R., Versuchsreihe mit flugasche-einfluss von flugasche-stäuben unterschiedlicher qualität auf die detoneigenschaften, Baugewerbe, pp. 44-49, 1983.
- Mesli I., Charif I., Etude rhéologique de l'interaction entre les additions minérales et organiques sur des mortiers, Master en Génie Civil, Université de Tlemcen, Soutenu en Mai 2016, 114p.
- Nawa T., Eguchi H., "Effect of cement characteristics on the fluidity of cement paste containing an organic admixture", Proceedings of the 9th International Congress of the Chemistry of Cements, vol. 4, 1992, pp.597-603.
- Neubauer C.M., Yang M., Jennings H.M., "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., Les propriétés des bétons, Edition Eyrolles, pp. 229-253, 2000.

- Ollivier J.-P., les bétons, bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, 1997.
- Page M., Moldovan A., Spiratos N., "*Performance of novel naphthalene-based copolymer as superplasticizer for concrete, in Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete*", Proceedings Sixth International Conference CANMET. 2000. Nice, France: ACI International.
- Park CK., Noh MH., Park TH., "*Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures*". Cement and concrete research, vol. 35,2005, pp.842-49.
- Plank J., Dai Z., Andres P.R., "*Preparation and characterization of new Ca Alpolycarboxylate layered double hydroxides*", Mater Lett, vol. 60(29-30), 2006, pp. 3614-17.
- Shen J.,Yurtdas I.,Diagana C.,Li A., "*Mix-design method of self-compacting concretes for pre-cast industry*". Canadian journal of civil engineering, vol 36 (9), 2009, pp.1459-69.
- Taleb O., Ghomari F., Boukli Hacene S.M.A., Les bétons autoplaçants: Etude multi-échelle, Les 1^{ers} Workshops de Génie Civil – Université Ziane Achour de Djelfa – 22 et 23 Février 2012.
- Uchikawa H., Hanehara S., Shirasaka T., Sawaki D., "*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.
- Uchikawa H., Hanehara H., Sawaki D., "*The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particules in fresh paste prepared with organic admixture*", Cement and concrete research, vol. 27(1), 1997, pp. 37-50.
- Waller V., Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression, these de doctorat, Ecole nationale des Ponts et Chaussées, paris, 1999.

- Yoshika K., Tazawa E., Kawai K., Enhota T., *"Adsorption characteristics of superplasticizers on cement components minirals"*, Cement and concrete research, vol. 32,2002, pp.1507-1513.
- Young JF. *"A Review of the mechanism of set-retardation in Portland cement pastes containing organic admixtures"*, Cement and concrete research, vol. 2, 1972, pp. 415-33.
- Zhang X., Han J., *"The effect of ultra-fine admixture on the rheological propertyof cement paste"*, Cement and concrete research, vol. 30(5), 2000,pp. 827–30.

Chapitre III

Caractérisation des matériaux et méthodes utilisées

III.1. Caractérisation des matériaux

III.1.1. 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 III.1, III.2 et III.3.

Tableau III.1 : Composition chimique du ciment (%) (SCIBS)

	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	-
Al ₂ O ₃	5.15	5.77	5.47	-
Fe ₂ O ₃	3.05	3.27	3.17	-
CaO	53.63	59.70	57.20	-
MgO	0.96	1.07	1.01	≤ 5
SO ₃	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 III.2 : Composition minéralogique du ciment (%) (SCIBS)

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
52.63	23.68	8.66	10.71

Tableau III.3 : Propriétés physico – mécaniques du ciment (SCIBS)

Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3649
Consistance (%)	26.32
Expansion à chaud (mm)	0.36
Début de prise (mn)	140
Résistance à la flexion 02 jours (bars) 07 jours (bars) 28 jours (bars)	4.11 5.91 7.24
Résistance à la compression 02 jours (bars) 07 jours (bars) 28 jours (bars)	16.94 31.67 46.02
La masse volumique apparente (Kg/m ³)	932
La masse volumique absolue (Kg/m ³)	3032

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme NF P 18-558. Nous avons pris la moyenne de 3 essais pour le calcul de la masse volumique absolue, en utilisant la méthode du pycnomètre.

III.1.2. Les fillers calcaires

Les fillers calcaires utilisées proviennent de la carrière Djebel Abiod de Sidi Abdelli. La roche est de nature calcaire dolomitique. Les analyses concernant les compositions chimiques et les propriétés physiques des fillers calcaires sont consignées sur le tableau III.4.

Tableau III.4 : Composition chimique et minéralogique des fillers calcaires (%) [Elbahi et al. (2016)]

SIO ₂	AL ₂ O ₃	FE ₂ O ₃	CAO	MgO	Na ₂ O	Cl	P ₂ O ₅	Tio ₂	loi	Densité	SS.Blaine (cm ² /g)
0.06	0.29	0.22	52.63	0.84	0.08	0.005	0.02	0.02	42.77	2.75	2416

III.1.3. Le sable

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

III.1.3.1. Les caractéristiques physiques du sable

Les caractéristiques physiques du sable sont représentées dans le tableau III.5 suivant :

Tableau III.5 : Caractéristiques physiques du sable.

M _v apparente (Kg/m ³) (NA 255)	1584	
M _v absolue (Kg/m ³) (NA 255)	La méthode de l'éprouvette graduée	2540
	La méthode du ballon	2630
Équivalent de sable (%) (NFP 18-598)	ESV	83,6
	ESP	80.9
Module de finesse	2.82 (Sable grossier)	
Coefficient d'absorption (%) (NF P 18-555)	1.45	

III.1.3.2. 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 III.1.

Tableau III.6 : 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 (%)
5	7	7	0,7	99,3
4	36	43	4,3	95,7
2	234	277	27,7	72,3
1,25	126	403	40,3	59,7
0,63	108	511	51,1	48,9
0,315	164	675	67,5	32,5
0,16	78	753	75,3	24,7
0,125	56	809	80,9	19,1
0,1	1	810	81	19
0,08	24	834	83,4	16,6
Fond	166	1000	100	0

A partir des résultats trouvés (tableau III.6), nous constatons que le sable est composé de 16.6% de particules inférieures à (80 μ m).

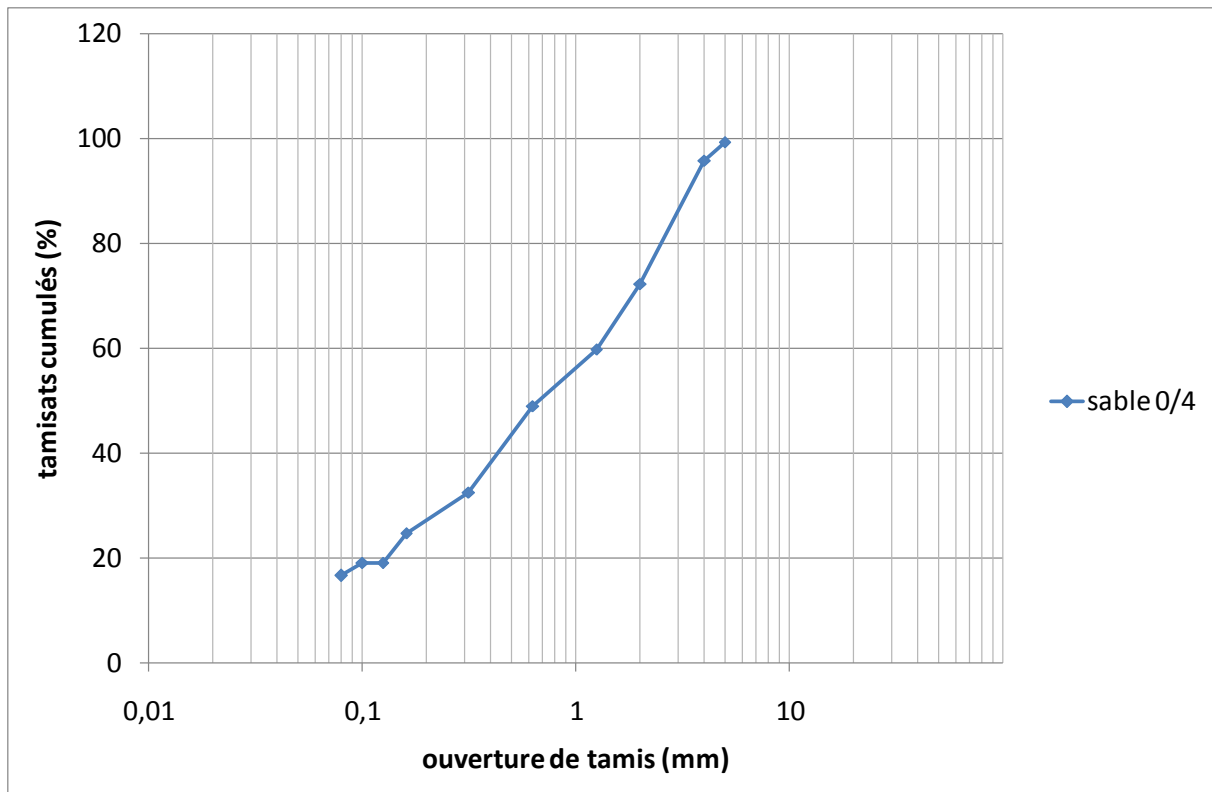


Figure III.1 : Courbe granulométrique du sable

III.1.4. Les additions organiques

- « TEK-SUPERFLOW 2000 R » (SP1) est un superplastifiant commercialisé par le groupe des sociétés HASNAOUI (Sidi Bel Abbas), cet adjuvant est conforme à la norme EN 934-2. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau avec effet retardateur spécialement formulé pour le béton prêt à l'emploi. Il est caractérisé d'une couleur brune et présentent une masse volumique de $1,17 \pm 0,03 \text{g/cm}^3$. Leur teneur en extrait sec est de $35 \pm 2\%$ et en chlorure est inférieure à 1%.
- « ORAFLOW THM 17200 » (SP2) est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la famille des polycarboxylates dit 3^{ème} génération. Il est recommandé pour les bétons prêts à l'emploi dans 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%.

III.2. 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 1:3.5:0.7 répondant aux recommandations des chapes autoplçantes. Afin d'avoir la quantité nécessaire pour effectuer l'ensemble des essais, nous avons choisi de travailler avec un dosage de 640 g de ciment pour le mortier de référence.

A partir de ce mortier de base, nous avons ajouté des proportions variables de 10, 20 et 30% de chaque addition minérale (fillers calcaires, poudre de marbre).

Les deux types de superplastifiants sont utilisés avec des dosages différents pour le « TEK-SUPERFLOW 2000 R » 1,4% et pour « ORAFLOW THM 17200 » 1,2% du poids du ciment pour déffloculer les grains du liant et faciliter leurs dispersions.

Les mesures au mini-cône et au rhéomètre sont effectuées immédiatement après le malaxage. Les tableaux III.7 et III.8 donnent les compositions des différents mortiers selon le type de superplastifiant utilisé.

Tableau III.7 : Les compositions des différents mortiers du SP1.

N	Ciment(g)	Sable(g)	Eau (ml)	Type d'addition	% D'additions	% de superplastifiant
1	640	2240	448	/	/	1,4%
2	576	2240	448	Fillers	10%	1,4%
3	512	2240	448	Fillers	20%	1,4%
4	448	2240	448	Fillers	30%	1,4%
5	576	2240	448	Marbre	10%	1,4%
6	512	2240	448	Marbre	20%	1,4%
7	448	2240	448	Marbre	30%	1,4%

Tableau III.8 : Les compositions des différents mortiers du SP2.

N	Ciment(g)	Sable(g)	Eau (ml)	Type d'additions	% D'additions	% de superplastifiant
1	640	2240	448	/	/	1,2%
2	576	2240	448	Fillers	10%	1,2%
3	512	2240	448	Fillers	20%	1,2%
4	448	2240	448	Fillers	30%	1,2%
5	576	2240	448	Marbre	10%	1,2%
6	512	2240	448	Marbre	20%	1,2%
7	448	2240	448	Marbre	30%	1,2%

III.3. Démarches méthodologiques

III.3.1. Essai du cône pour mortier

Le cône pour mortier 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 III.2 : Illustration du mini cône.

III.3.2. Essai au rhéomètre

L'étude des paramètres rhéologiques a été faite à l'aide d'un agitateur à vane de type Heidolph (figure III.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 III.3 : Dispositif de l'essai rhéologique.

Le principe consiste à mettre en rotation à différentes vitesses un cylindre ou une pôle 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 50 mm et une hauteur de 130 mm. Une fois le récipient fixé, on place la pale de diamètre 25 mm et de hauteur 100 mm au centre de l'échantillon.

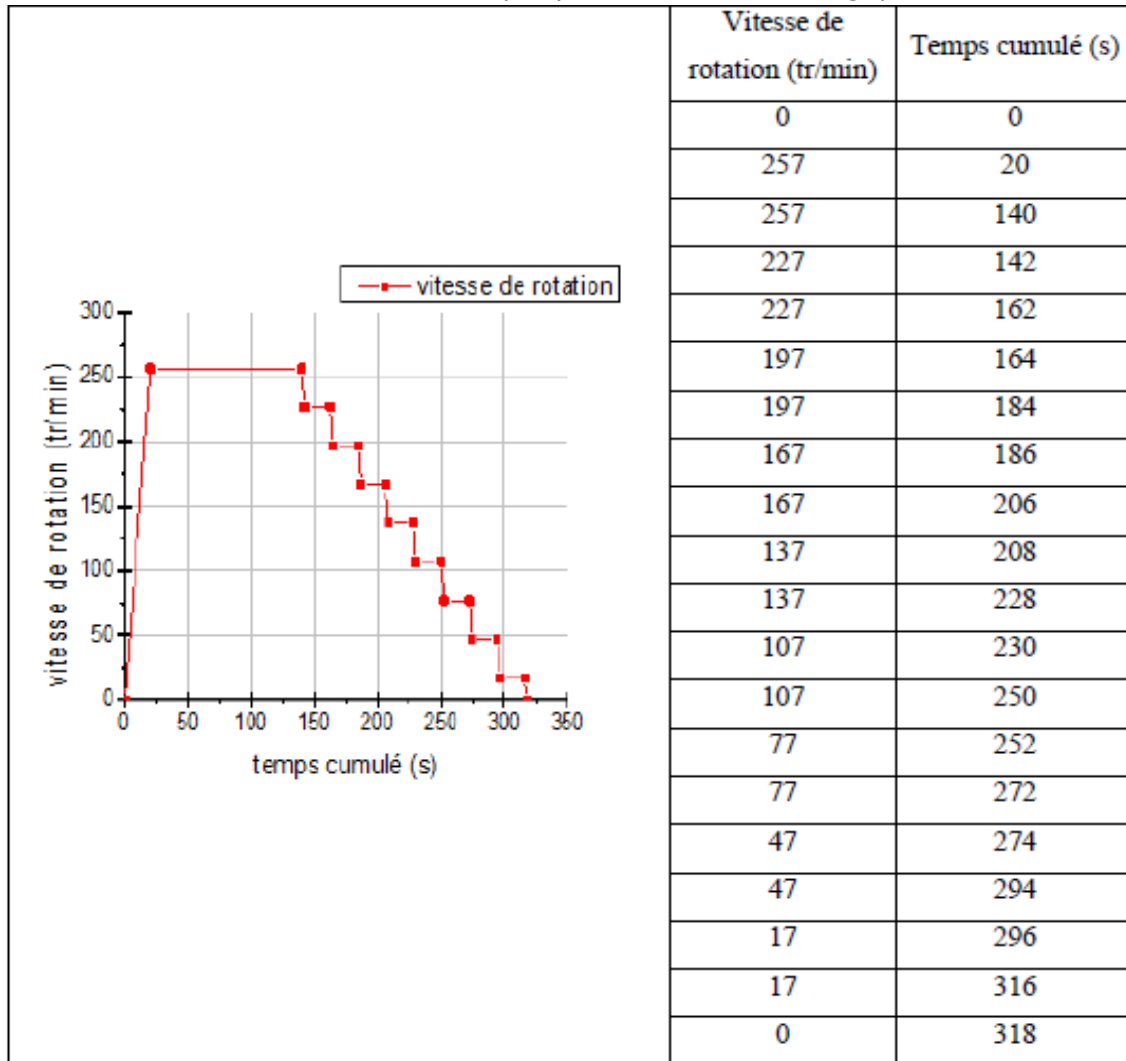
Cependant, il faut s'assurer que l'extrémité supérieur du croisillon se situe à l'arase du mortier. Chaque seconde, un logiciel de pilotage « watch and control » permet la capture du couple exercé selon la vitesse de rotation appliquée (Ω) (Figure III.4).

Le profil de vitesse adopté a été choisi sur la base des travaux de Soualhi et col. (2004). Ce profil permet d'avoir des mesures plus stables tout en minimisant le phénomène de ségrégation. Toutefois, il est nécessaire que le profil choisi doive comporter suffisamment de points afin de bien caractériser le comportement rhéologique du mortier.



Figure III.4 : Evolution du couple et la vitesse de rotation en fonction du temps

Tableau III.9 : 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.4. 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 :

$$M = M_0 + k. \Omega \quad (III.1)$$

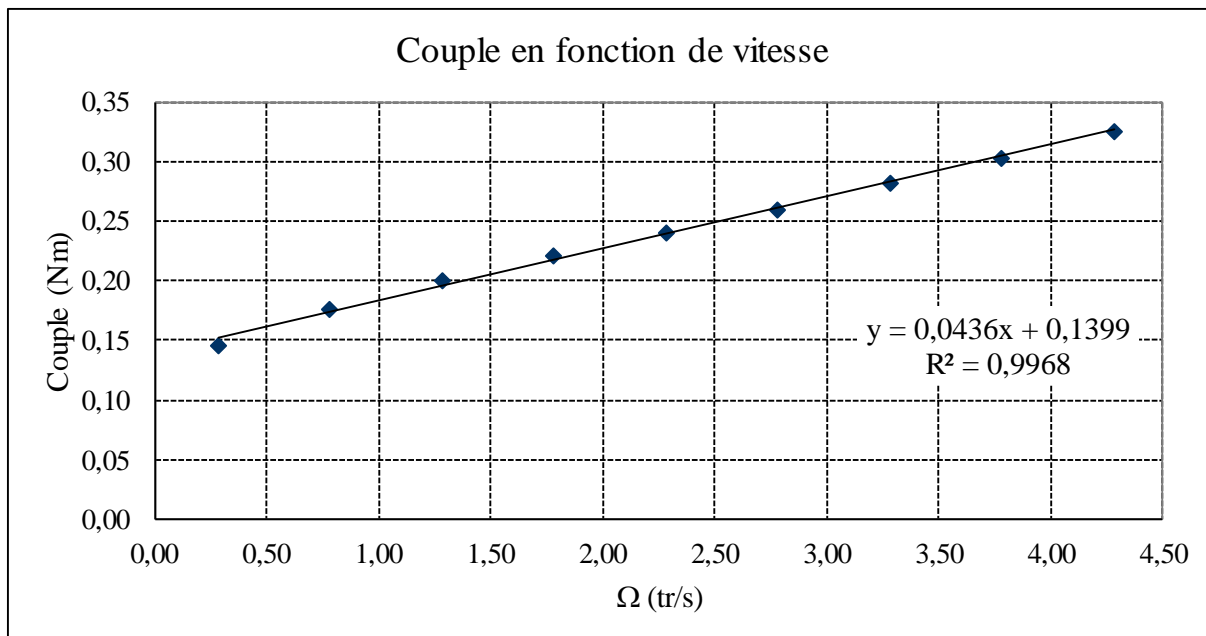


Figure III.5 : Evaluation du couple en fonction de la vitesse

Cinquième étape :

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

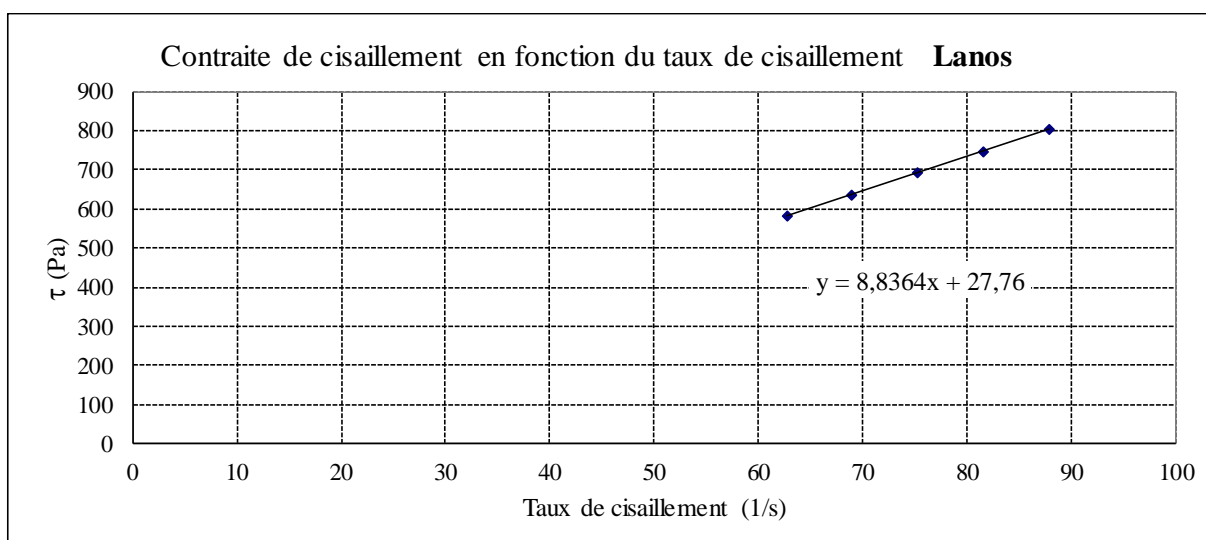


Figure III.6 : Evaluation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

III.5. 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 (Figure III.7).

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

$$\dot{\gamma} = 2 \cdot \frac{M \cdot \frac{d\Omega}{dM}}{\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right)} - \frac{\Omega - M \cdot \frac{d\Omega}{dM}}{\ln\left(\frac{R_b}{R_c}\right)} \quad (\text{III.3})$$

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.

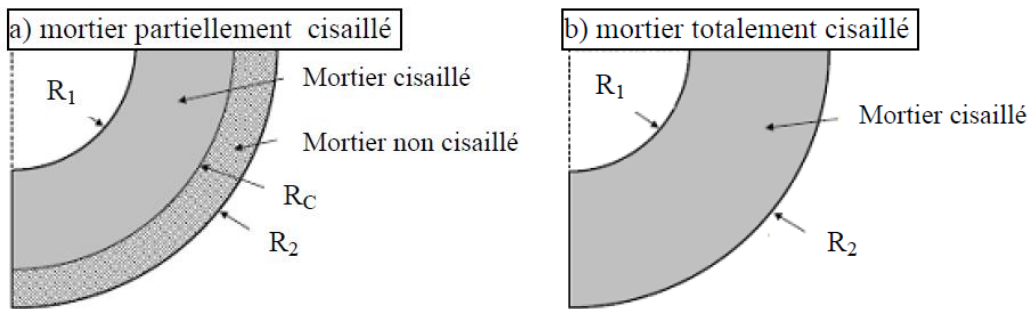


Figure III.7 : Mortier partiellement et totalement cisailé.

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

$$\dot{\gamma} = \max(\dot{\gamma}_j; \dot{\gamma}_i) \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$\frac{d\Omega_j}{dM_j} \cong \frac{\Omega_{j+1} - \Omega_{j-1}}{M_{j+1} - M_{j-1}} ; \quad i = j \text{ et } j = 1 \dots n \quad (\text{III.5})$$

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

$$\tau_i = \frac{1}{2}(\tau_{j-1} + \tau_{j+1}) \quad (\text{III.6})$$

Avec

$$\tau_j(M) = \frac{M_j}{2nhR_b^2} \quad (\text{III.7})$$

Les équations (III.4) et (III.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.

III.6. Essai de la résistance mécanique

III.6.1. Confection des éprouvettes prismatiques

Des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ de mortiers sont confectionnées et maturées dans l'eau pendant 28 jours pour les essais mécaniques de compression et de traction par flexion.



Figure III.8 : Éprouvettes prismatiques des mortiers.

III.6.2. 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 III.9). La contrainte de résistance considérée

pour chaque type de mortier est donnée par la formule (III.8) et déduite de la moyenne de trois essais d'écrasement.

$$R_C = \frac{F}{d^2} \quad (\text{III.8})$$

Ou :

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 III.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 III.10.

$$R_t = \frac{3FL}{2d^3} \quad (\text{III.9})$$

Ou :

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 III.10 : Dispositif de flexion 3 points.

III.7. Essai du ressuage

À des échéances de 5, 10, 20, 30min, nous avons récupéré l'eau ressuée grâce à une seringue.

L'eau totale ressuée est la somme des différentes prises.

III.8. Références

- Adjoudj M. « Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton ». Thèse de doctorat, soutenue en 2015, Université Cergy Pontoise, France, 161p.
- Elbahi B., « Influence des fillers calcaires et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés mécaniques du béton – Utilisation de la méthode de fréquence de résonance » Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Tlemcen, Soutenue en Novembre 2016.
- 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.

- 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.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

L'utilisation des additions minérales et organiques dans les mélanges cimentaires affecte directement les propriétés rhéologiques et mécaniques de ces mélanges. Ce chapitre regroupe les résultats et les interprétations relatives à l'influence des additions minérales et organiques sur les mortiers.

IV.2. Compatibilité des superplastifiants avec les liants



(a) combiné à SP1 (b) combiné à SP2 (c) combiné à Unicum

Figure IV.1 : Compatibilité des superplastifiants avec les liants

A partir de la figure IV.1, nous constatons que le superplastifiant Unicum a causé une prise rapide et une ségrégation.

Ce constat confirme que ce superplastifiant est incompatible avec les additions utilisées, et de ce fait, il a été éliminé du programme expérimental. Par ailleurs, les deux autres superplastifiants SP1 et SP2 ont été bénéfiques sur le plan de la rhéologie.

IV.3. Les essais d'étalement

IV.3.1. Combinaisons entre les fillers calcaires et les superplastifiants SP1 et SP2

L'utilisation des fillers calcaires a permis d'améliorer l'étalement. A ce titre nous avons remarqué qu'une substitution de 30% de fillers calcaires combinée au SP1 a amélioré la fluidité de 24,42%, alors que 20% a permis d'améliorer l'étalement de 17,85%.

Par contre, l'effet de la combinaison entre les fillers calcaires et SP2 est moins clair.

Toutefois, les meilleurs étalements ont été obtenus avec cette combinaison.

En plus, le SP2 qui est de la 3^{ème} génération de la famille des polycarboxylates est plus puissant car il permet une dispersion des particules par effet stérique et une répulsion électrostatique c'est ce qui a permis de contribuer à ce résultat.

Par contre le SP1 qui est de la famille des lignosulfonate a permis d'agir uniquement par une répulsion électrostatique.



(a) combiné à SP1

(b) combiné à SP2

Figure IV.2 : Etalement des mortiers avec fillers calcaires

La figure IV.3 présente les variations des étalements en fonction des taux des fillers calcaires combinés aux superplastifiants SP1 et SP2. Nous remarquons sur cette figure que tous les mortiers obtenus par une combinaison de 1,4% du superplastifiant SP1 ou 1,2% du superplastifiant SP2 avec 0, 10, 20 et 30% des fillers calcaires ont aboutit à des mortiers autoplacants où l'étalement est supérieure à 22 cm.

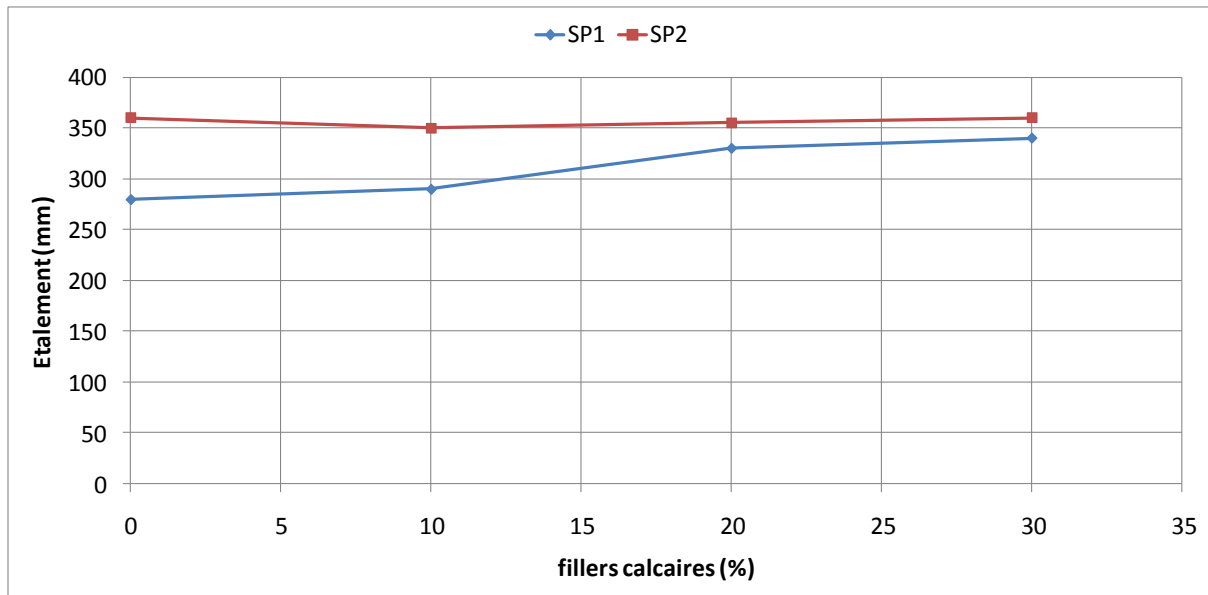


Figure IV.3 : Variation de l'étalement des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2.

L'effet du superplastifiant SP2 est nettement meilleure car il a permis d'avoir des mortiers qui s'étaient mieux que ceux confectionnés avec le superplastifiant SP1 (Figures IV.2, IV.3).

IV.3.2. Combinaisons entre la poudre de marbre et les superplastifiants SP1 et SP2

La figure IV.4 présente les variations des étalements en fonction des taux de poudre de marbre combinés aux superplastifiants SP1 et SP2. Presque les mêmes tendances obtenues précédemment ont été aussi constatées sur les mélanges à base de poudre de marbre combinée avec les superplastifiants SP1 et SP2.

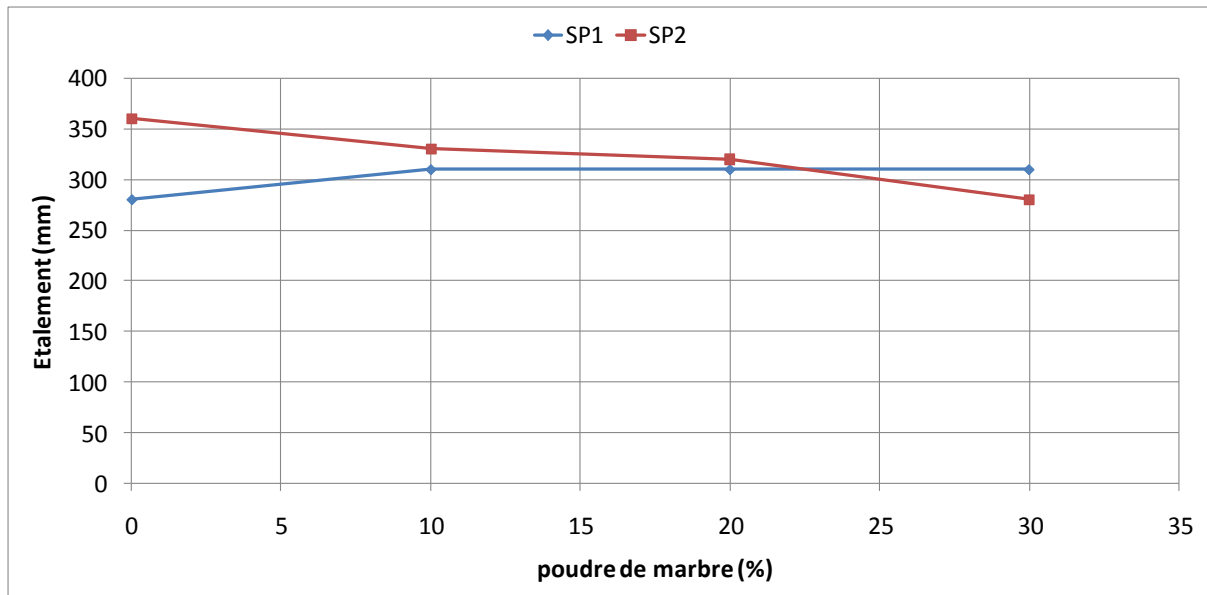


Figure IV.4 : Variation de l'étalement des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2.

Cependant, les fillers calcaires, caractérisés par une finesse plus élevée, ont été plus efficaces sur le plan de la fluidité par rapport à la poudre de marbre.

Toutefois, nous avons remarqué que l'augmentation de la substitution du ciment par la poudre de marbre combinée au SP2 conduit à une diminution de la fluidité. Cela peut être dû à la demande en SP2 qui est plus élevée chez la poudre de marbre.

IV.4. Le seuil de cisaillement

IV.4.1. Combinaisons entre les fillers calcaires et les superplastifiants SP1 et SP2

La figure IV.5 présente les variations des seuils de cisaillement en fonction des taux des fillers calcaires combinés aux superplastifiants SP1 et SP2. En effet, les fillers calcaires caractérisés 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].

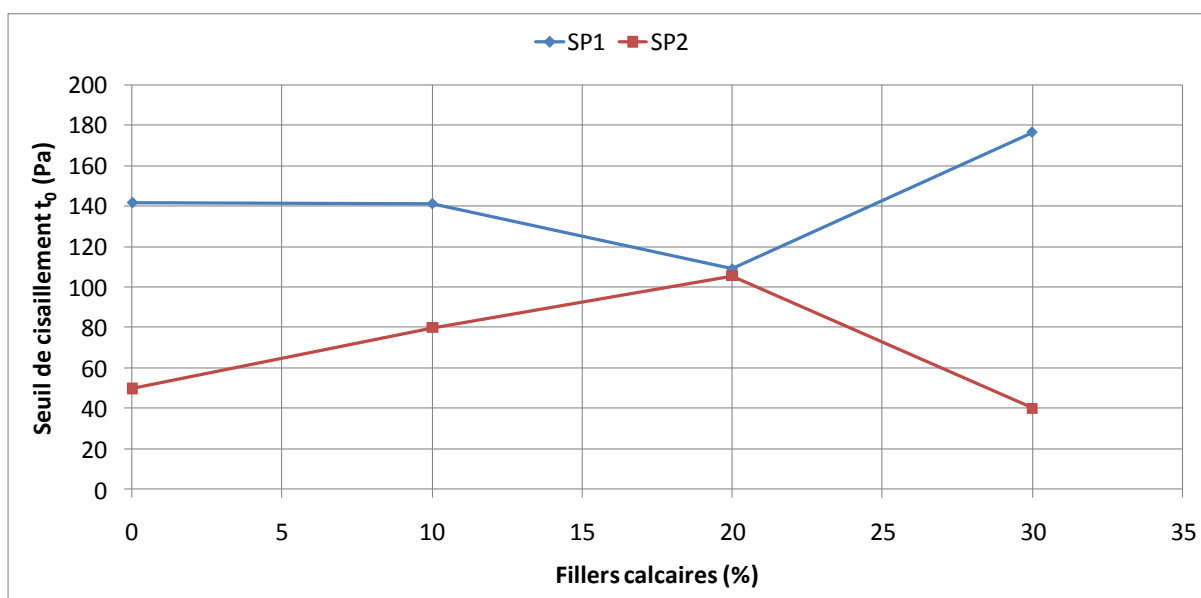


Figure IV.5 : Variation du seuil de cisaillement des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2.

Sur cette figure nous constatons que les fillers calcaires ont plus tendance à augmenter le seuil de cisaillement sauf pour le superplastifiant SP1 avec 20% de fillers et le superplastifiant SP2 et 30% de fillers.

Par ailleurs, Nous avons aussi remarqué que le superplastifiant SP2 à base des polycarboxylates est plus recommandé pour faire diminuer le seuil de cisaillement.

IV.4.2. Combinaisons entre la poudre de marbre et les superplastifiants SP1 et SP2

A partir de la figure IV.6, il est clair que l'augmentation de la teneur en poudre de marbre augmente le seuil de cisaillement pour les mortiers à base du superplastifiant SP2. Par contre, pour ceux à base du superplastifiants SP1, le seuil de cisaillement augmente jusqu'à la substitution de 10% puis à tenfance à diminuer. Par ailleurs, en combinaison avec la poudre de marbre, il semble que le superplastifiant SP1 amène à des seuils de cisaillement plus élevés par rapport au superplastifiant SP2 et ceci jusqu'à la valeur de 25% de substitution. Au delà de cette valeur c'est l'inverse qui se produit.

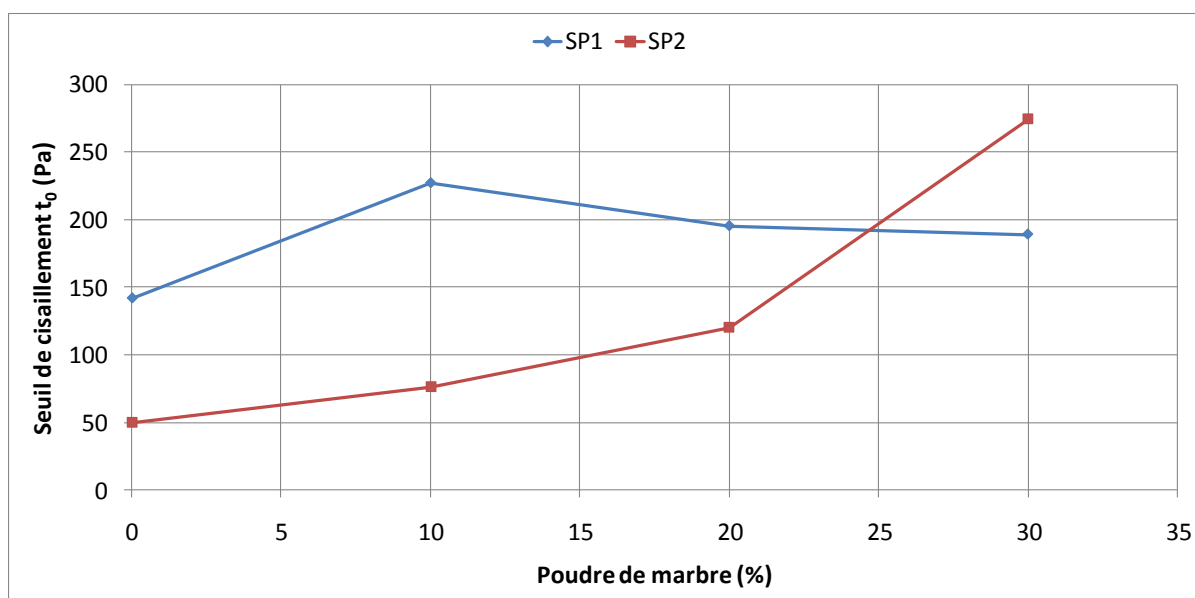


Figure IV.6 : Variation du seuil de cisaillement des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2.

IV.5. La viscosité plastique

IV.5.1. Combinaisons entre les fillers calcaires et les superplastifiants SP1 et SP2

La figure IV.7 présente la variation de la viscosité en fonction des taux des fillers calcaires combinés aux superplastifiants SP1 et SP2. Le dépouillement des résultats illustrés sur la figure IV.6 montre qu'en général le superplastifiant SP2 est plus recommandé pour réduire la viscosité lorsqu'on utilise les fillers calcaires. La combinaison (fillers calcaires/superplastifiants SP2) a donné des mortiers moins visqueux que ceux avec des fillers calcaires associés au superplastifiant SP1 et ceci jusqu'à un certain pourcentage en fillers de 27% environ, au delà de ce pourcentage les tendances s'inversent.

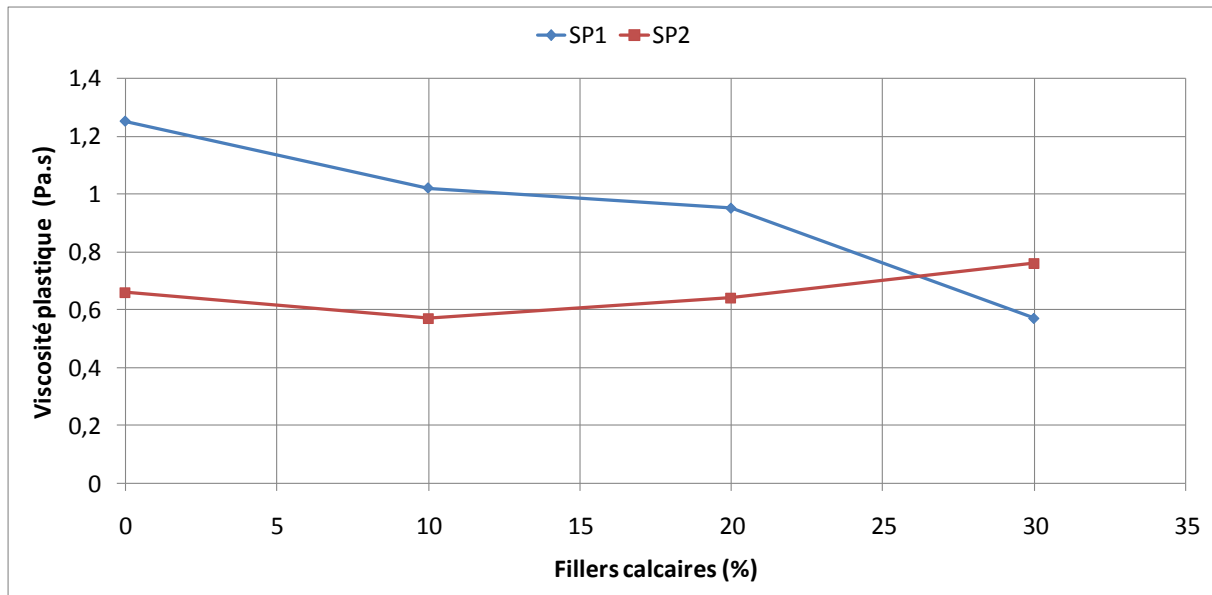


Figure IV.7 : Variation de la viscosité des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2.

IV.5.2. Combinaisons entre la poudre de marbre et les superplastifiants SP1 et SP2

La figure IV.8 présente la variation de la viscosité en fonction des taux de la poudre de marbre combinés aux superplastifiants SP1 et SP2. les résultats illustrés sur la figure IV.8 sont presque similaires à ceux présentés précédemment, c'est-à-dire que, La combinaison (poudre de marbre/superplastifiants SP2) a donné des mortiers moins visqueux que les ceux avec la poudre de marbre associés au superplastifiant SP1, sauf au sein de l'intervalle [7% 14%] de poudre de marbre ou les tendances s'inversent.

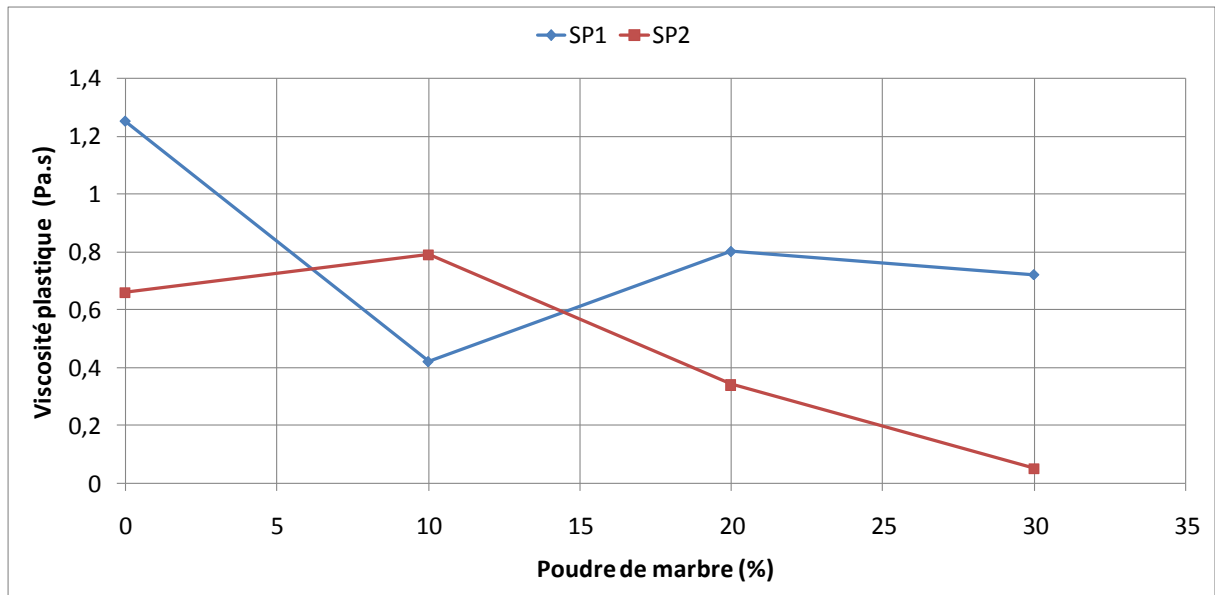
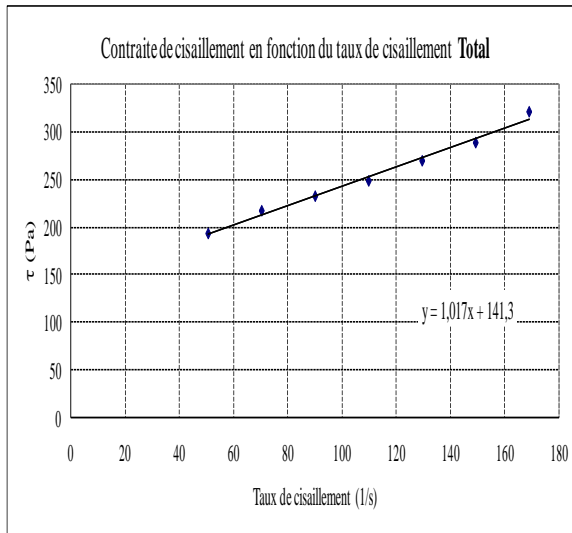


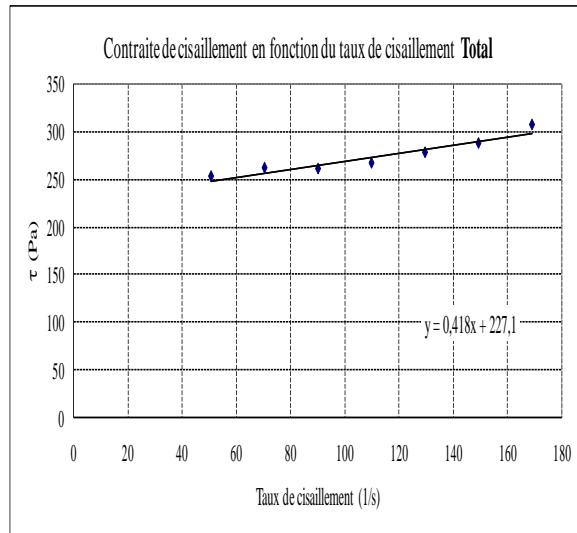
Figure IV.8 : Variation de la viscosité des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2.

Par ailleurs, les fillers calcaires combinées au superplastifiant SP2 amènent à des viscosités plus grandes par rapport à des mortiers à base de poudre de marbre combinés avec ce même superplastifiant.

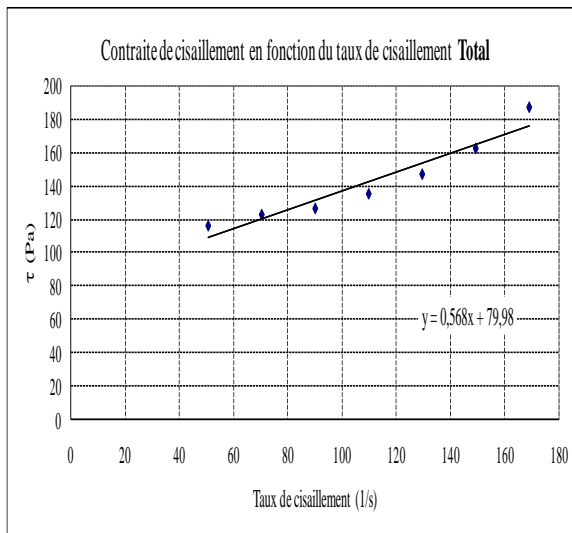
IV.5.3. Modèle rhéologique



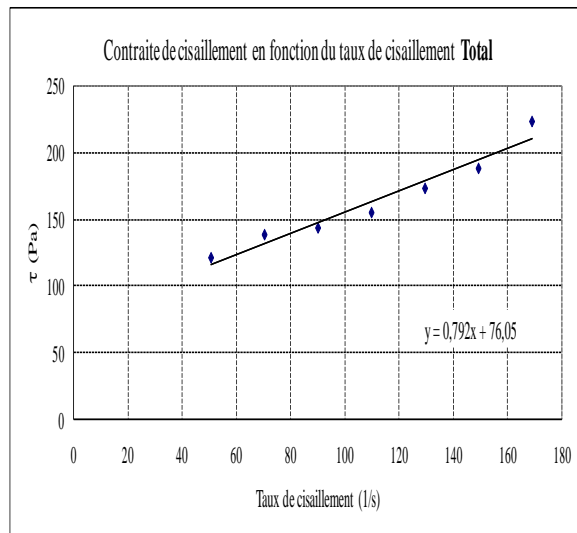
M2 : Fillers calcaires avec SP1



M5 : Poudre de marbre avec SP1



M9 : Fillers calcaires avec SP2



M12 : Poudre de marbre avec SP2

Figure IV.9 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement total

A partir de la figure IV.9, nous constatons que le comportement de nos mortiers combinées aux superplastifiants SP1 et SP2 et soit aux fillers calcaire ou la poudre de marbre est linéaire et s'adapte au modèle de Bingham.

IV.6. Le ressuage

IV.6.1. Combinaisons entre les fillers calcaires et les superplastifiants SP1 et SP2

La figure IV.10 présente la variation du ressuage en fonction des taux des fillers calcaires combinés aux superplastifiants SP1 et SP2. Les résultats de la figure IV.10 montrent que la combinaison (fillers calcaires/superplastifiants SP2) a donné des mortiers dont le ressuage est plus faible que ceux avec des fillers calcaires associés au superplastifiant SP1.

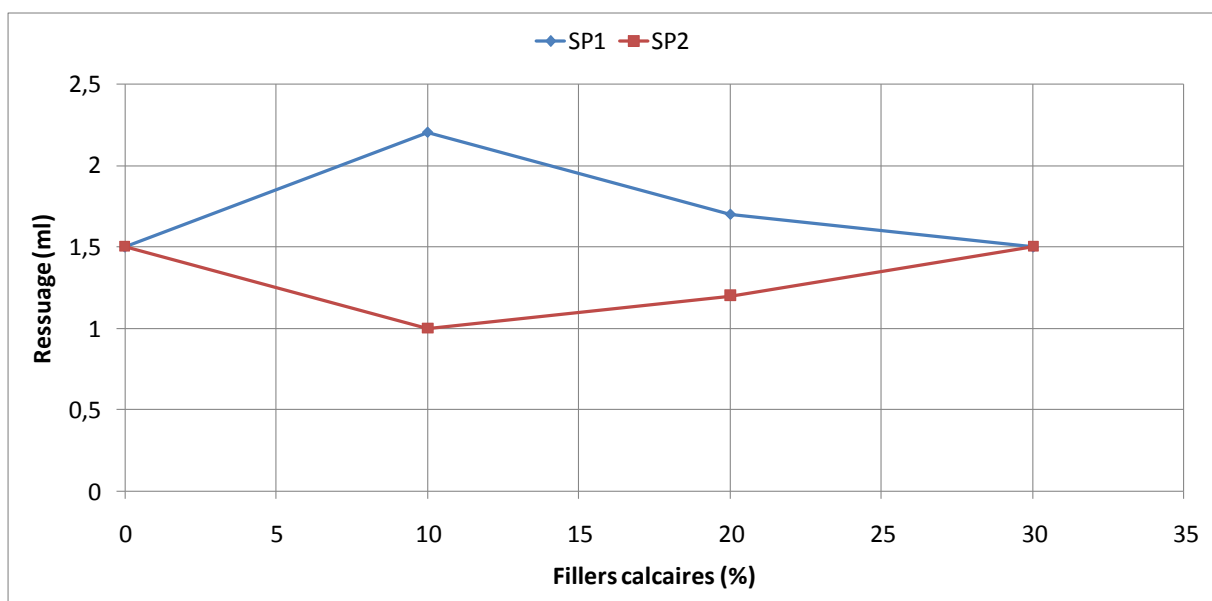


Figure IV.10 : Variation du ressuage des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2.

A partir de la figure IV.10, nous constatons que le superplastifiant SP2 est plus efficace pour réduire le ressuage lorsqu'on utilise les fillers calcaires.

IV.6.2. Combinaisons entre la poudre de marbre et les superplastifiants SP1 et SP2

La figure IV.11 présente la variation du ressuage en fonction des taux de poudre de marbre combinés aux superplastifiants SP1 et SP2. Les

résultats illustrés sur cette figure sont inverses à ceux présentés précédemment, c'est-à-dire que, La combinaison (poudre de marbre/superplastifiants SP1) a donné des mortiers dont le ressuage est plus faible que ceux avec la poudre de marbre associés au superplastifiant SP2. Cette figure montre aussi que le superplastifiant SP1 est plus recommandé pour réduire le ressuage lorsqu'on utilise la poudre de marbre.

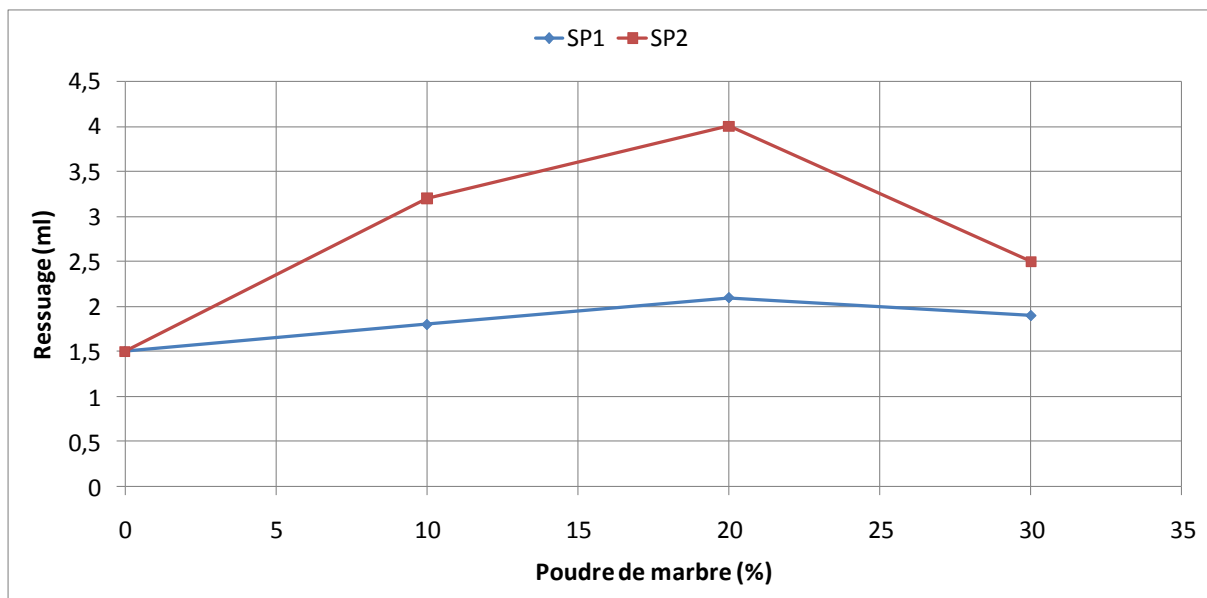


Figure IV.11 : Variation du ressuage des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2.

D'une autre façon général le taux de ressuage est relativement faible.

Ce résultat est du à la composition des mélanges qui sont assez stable grâce aux micro-fines présentes dans le sable

IV.7. Les résistances

IV.7.1. Combinaisons entre les fillers calcaires et les superplastifiants SP1 et SP2

A partir de la figure IV.12, il est clair que l'augmentation de la teneur en fillers calcaires diminue la résistance à la compression des mortiers et ceci pour les deux superplastifiants SP1 et SP2.

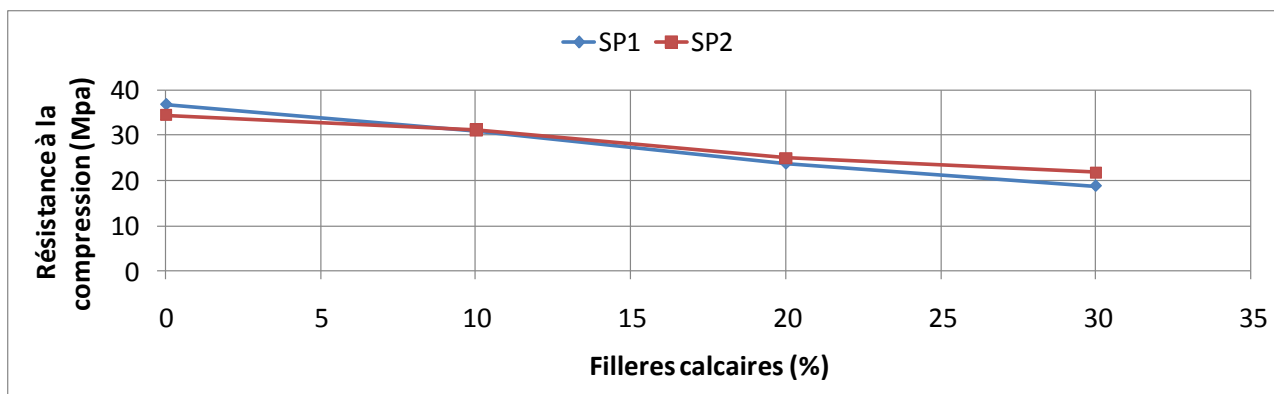


Figure IV.12 : Résistance à la compression des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2.

A partir de la figure IV.12 nous constatant que 10, 20 et 30% de filler calcaire avec le SP1 diminue respectivement la résistance à la compression de 18,58 ; 30,91 et 26,29.

Les résultats trouvés lors des essais de flexion sont en accord avec ceux des essais de compression. En effet la substitution partielle du ciment par des fillers calcaires s'accompagne toujours par une diminution de la résistance à la flexion du matériau, et ceci quelque soit le type du superplastifiant utilisé.

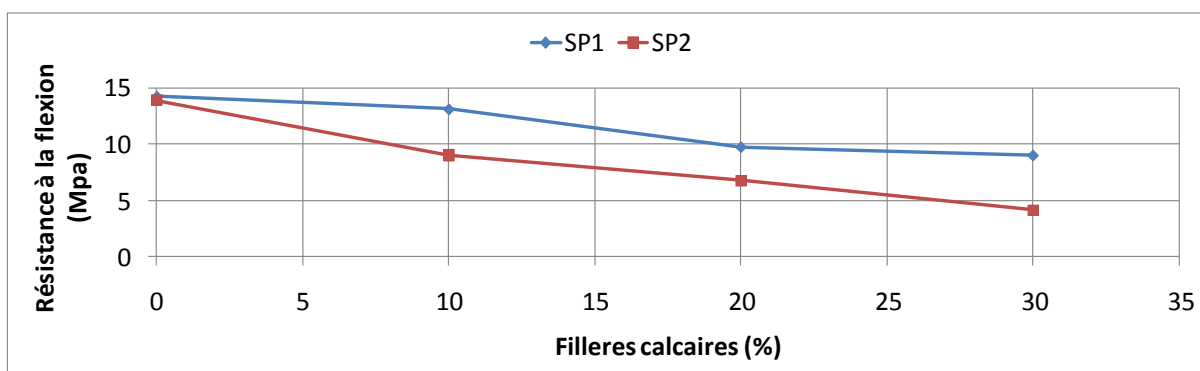


Figure IV.13 : Résistance à la flexion des mortiers en fonction des taux des fillers calcaires et des superplastifiants SP1 et SP2.

IV.7.2. Combinaisons entre la poudre de marbre et les superplastifiants SP1 et SP2

La combinaison entre le superplastifiant SP1 et la poudre de marbre permet d'améliorer légèrement les résistances à la compression des mortiers par rapport au superplastifiant SP2 (Figure IV.12).

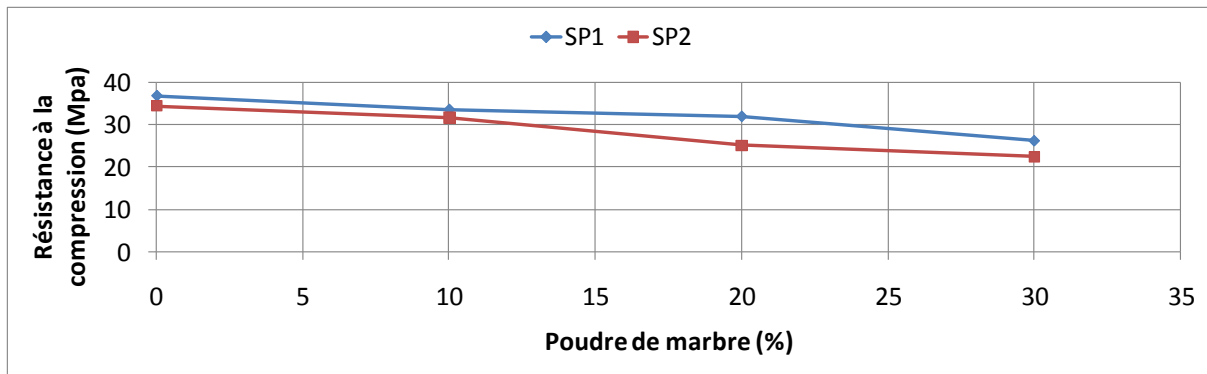


Figure IV.14 : Résistance à la compression des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2.

Les résultats obtenus des essais de flexion (Figure IV.15) sont en adéquation avec ceux de la compression (Figure IV.14).

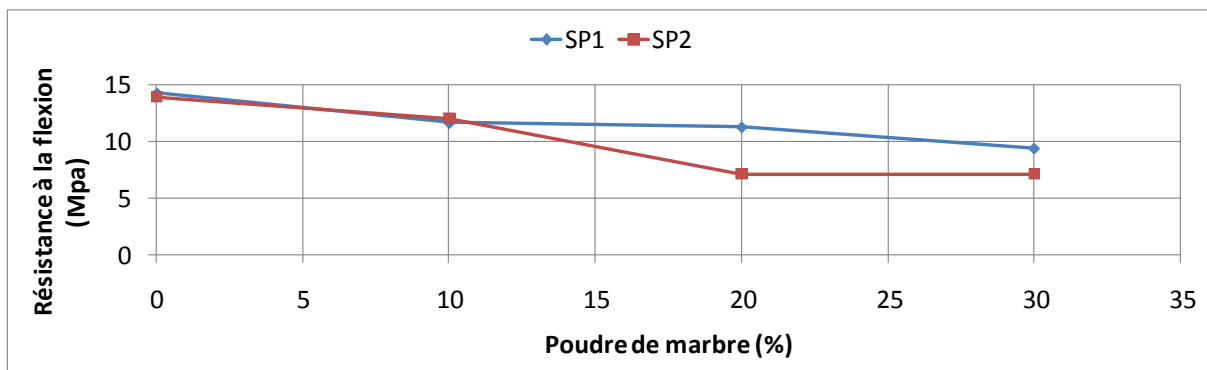


Figure IV.15 : Résistance à la flexion des mortiers en fonction des taux de poudre de marbre et des superplastifiants SP1 et SP2.

En comparant entre les fillers calcaires et la poudre de marbre nous constatons que la poudre de marbre a permis d'obtenir des résistances plus élevées que celles obtenues avec les fillers calcaires.

IV.8. 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, le superplastifiant SP2 à un effet meilleur par rapport au superplastifiant SP1.

En comparant les deux types d'additions minérales, nous remarquons que la poudre de marbre à permis d'assurer les meilleures résistances.

IV.9. Référence

- 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

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous avons étudié le comportement rhéologique des mortiers confectionnés en substituant une partie du ciment par deux types d'additions minérales (fillers calcaires et poudre de marbre) ainsi que l'utilisation de deux additions organiques. A partir des résultats obtenus, plusieurs conclusions peuvent ressortir :

- ✓ Tous les mortiers obtenus par une combinaison de 1,4% du superplastifiant SP1 ou 1,2% du superplastifiant SP2 avec 0, 10, 20 et 30% des fillers calcaires ont aboutit à des mortiers autoplaçants où l'étalement est supérieure à 22 cm.
- ✓ L'effet du superplastifiant SP2 est nettement meilleure car il a permis d'avoir des mortiers qui s'étaient mieux que ceux confectionnés avec le superplastifiant SP1.
- ✓ Les fillers calcaires, caractérisés par une finesse plus élevée, ont été plus efficaces sur le plan de la fluidité par rapport à la poudre de marbre.
- ✓ les fillers calcaires ont plus tendance à augmenter le seuil de cisaillement sauf pour le superplastifiant SP1 avec 20% de fillers et le superplastifiant SP2 et 30% de fillers.
- ✓ En général le superplastifiant SP2 est plus recommandé pour réduire la viscosité lorsqu'on utilise les fillers calcaires.
- ✓ Les fillers calcaires combinées au superplastifiant SP2 amènent à des viscosités plus grandes par rapport à des mortiers à base de poudre de marbre combinés avec ce même superplastifiant.
- ✓ Le comportement des mortiers combinées aux superplastifiants SP1 et SP2 et soit aux fillers calcaire ou la poudre de marbre est linéaire et s'adapte au modèle de Bingham.
- ✓ Le superplastifiant SP2 est plus efficace pour réduire le ressage lorsqu'on utilise les fillers calcaires.
- ✓ Le superplastifiant SP1 est plus recommandé pour réduire le ressage lorsqu'on utilise la poudre de marbre.
- ✓ L'augmentation de la teneur en fillers calcaires diminue la résistance à la compression des mortiers et ceci pour les deux superplastifiants SP1 et SP2.

- ✓ Le superplastifiant SP1 et la poudre de marbre ont permis d'améliorer légèrement les résistances à la compression des mortiers par rapport au superplastifiant SP2.
- ✓ La poudre de marbre a permis d'obtenir des résistances plus élevées que celles obtenues avec les fillers calcaires.

Perspectives :

Notre investigation laisse la porte ouverte sur d'autres contributions à l'avenir afin d'enrichir ce travail par d'autres travaux, à savoir :

- ✓ Utilisation d'autres types d'additions minérales comme les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux, la fumée de silice ainsi que d'autres additions organiques.
- ✓ Etaler cette recherche à l'échelle du béton afin de déterminer des modèles mathématiques qui peuvent être utilisés in situ.