

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ -BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département Génie Civil

Mémoire fin d'étude

Présenté par :

MECHETEM Amina
OMANI Nour el houda

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème :

Etude de compatibilité ciment-super plastifiant

Devant le jury composé de :

ARBAOUI Ahcene	MCB	UAMOB	Président
ARIBI Chouaib	MCB	UAMOB	Encadreur
MESBOUA Nouredine	MCB	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre promoteur Monsieur ARIBI pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition, pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apportées durant notre étude et réalisation de ce projet.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réalisation du présent travail.

AMINA&NOUR EL HOUDA

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mon père, ma mère pour l'éducation qu'ils ont su me donner et qui m'a permis avec l'aide de DIEU d'arriver là où je suis. Je dédie ce mémoire à mon mari et tous mes frères et sœurs, mon neveu sans exception et ma famille et ma belle famille et enfin à tous les amis.

M.AMINA

A ma mère et mon mari pour l'éducation qu'ils ont porté à mon égard A mes sœurs, A mon grand père maternel et ma famille Je vous dédie ce modeste travail.

O.NOURELHOUDA

Résumé

L'objectif de cette recherche consiste à étudier la compatibilité des différents superplastifiants avec le ciment. Notre travail consiste donc à étudier les propriétés chimique et minéralogique des différents super-plastifiant et aussi les propriétés rhéologiques et les caractéristiques physiques des superplastifiants de type polycarboxylate. Cette étude a pour but d'évaluer d'efficacité des superplastifiants à base de polycarboxylates (PC) en présence d'un ciment portland.

Mots clés : ciment, rhéologie, superplastifiant, étalement.

ملخص

الهدف من هذا البحث هو دراسة توافق الملدنات الفائقة المختلفة مع الإسمنت . لذلك يتمثل عملنا في دراسة الخصائص الكيميائية و المعدنية لمختلف الملدنات الفائقة و كذلك الخصائص الانسيابية و الخصائص الفيزيائية الفائقة متعدد. الغرض من هذه الدراسة هو تقييم فعالية الملدنات الفائقة متعددة الكربوكسيل في وجود الإسمنت البورتلاندي

الكلمات المفتاحية: الإسمنت، الريولوجيا، الملدن، المتفوق، إنبساط .

Abstract

The objective of this research is to study the compatibility of different superplasticizers with cement. Our work therefore consists in studying the chemical and mineralogical properties of the various superplasticizers and also the rheological properties and the physical characteristics of the superplasticizers of the poly-carboxylate type. The purpose of this study is to evaluate the effectiveness of polycarboxylate (PC) superplasticizers in the presence of Portland cement.

Keywords: cement, rheology, superplasticizer, spread.

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1.1. Introduction	3
1.2. Définition de ciment	3
1.2.1. Les constituants du ciment anhydre	4
i. Constituant principales	4
ii. Constituants secondaires	4
a) Sulfate de calcium	4
b) Additifs.....	4
1.2.2. Notation de la chimie des ciments.....	5
1.3. PROCESSUS DE FABRICATION DES CIMENTS COURANTS	5
1.4. PROPRIETES DE CIMENT	8
I.4.1 Propriétés chimiques	8
I.4.1.1. Composition chimique des ciments	8
I.4.1.2. Compositions minéralogiques du clinker.....	9
a. Silicate tricalcique, (l'alite) C_3S	9
I.4.2. Propriétés physiques	10
a. Délais de prise	10
b. Durcissement	11
c. Phénomène de fausse prise.....	11
d. Chaleur d'hydratation.....	11
e. Finesse de mouture	11
f. Retrait	12
g. Expansion	12
h. Gonflement.....	12
i. Le besoin d'eau	12
j. Durée de conservation	13
I.4.3 Les propriétés mécaniques	13
I.5 Hydratation de ciment.....	13
I.5.1 Hydratation des phases du clinker.....	14
I.5.2 Hydratation des constituants principaux de clinker	15

a) Silicate tricalcique (C ₃ S)	15
b) Le silicate bi calcique (C ₂ S)	16
c) L'aluminat tricalcique (C ₃ A) et le gypse	16
d) Aluminoferrite tétracalcique (C ₄ AF)	16
II. Introduction.....	18
II.1. Définition l'adjuvant.....	18
II.2. Utilités	18
II.2.1. Classification des adjuvants est basée sur leur fonction principale	19
II.3. Supersplastifiants	20
II.3.1. Définition.....	20
II.3.2. Les différentes classes de super-plastifiant.....	21
II.3.2.1. Super-plastifiant à base de sulfonâtes	21
II.3.2.2. Superplastifiant à base de carboxylates	21
II.3. Mode d'action de super-plastifiant	21
II.4. Synthèse des polycarboxylate.....	22
II.5. Effet des superplastifiants sur l'hydratation du ciment.....	23
II.6. Comportement rhéologique des systèmes superplastifiant-ciment :.....	24
II.7. CONCLUSION.....	25
III.1. Définition de la rhéologie	27
III.2. Paramètres rhéologiques des suspensions	27
III.2.1. Élasticité	27
III.2.2. Plasticité	28
III.2.3. Viscosité	28
III.2.4. Seuil de cisaillement.....	28
III.2.5. Viscosité plastique.....	28
III.2.6. La thixotropie	28
III.3. Comportements du fluide	29
III.4. Importance des forces de cisaillement.....	30
III.5. Rhéologie de la pâte de ciment.....	30
III.6. Influence de l'évolution chimique.....	31
V. Étude expérimentale	32
V.1. Matériaux d'étude.....	32
V.1.1. Ciment	32
V.1.2. Superplastifiants	33
V.2. Point de saturation	34
V.2.1. Mode opératoire.....	35

V.2.2. Résultats et discussion	38
V.3. Essai d'étalement au mini cône	45
V.3.1. Mode opératoire.....	45
V.3.2. Résultats et discussions	46
CONCLUSION GENERALE	50
Recommandations	51
BIBLIOGRAPHIE	52

Liste des figures

Figure 1. Fabrication du ciment.....	7
Figure 2. Evolution des températures à l'intérieur du four et formation des minéraux.....	8
Figure 3. Représentation schématique proposée par Taylor de la réaction du C3S avec l'eau [8]	15
Figure 4. Mode d'action d'une molécule de super-plastifiants	22
Figure 5. Synthèse de polycarboxylate.....	23
Figure 6. Effet de superplastifiant sur le ciment.....	24
Figure 7. Effet des supersplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.....	25
Figure 8. Différents types d'écoulement de la matière.....	30
Figure 9. Les 14 supersplastifiants à base de polycarboxylates.	33
Figure 10. Préparation de ciment.....	34
Figure 11. Viscosimètre VT550	35
Figure 12. Mode opératoire de mélange ciment super-plastifiants.....	36
Figure 13. Présente l'appareille de viscosimètre.	37
Figure 14. Notice technique de l'appareille	37
Figure 15. Rhéogramme de viscosité et contrainte de cisaillement des superplastifiant SP 1, SP2, SP3	38
Figure 16. Rhéogramme de viscosité et contrainte de cisaillement des superplastifiant SP 4, SP4, SP6	39
Figure 17. Rhéogramme de viscosité et contrainte de cisaillement des superplastifiant SP 7, SP8, SP9	40
Figure 18. Rhéogramme de viscosité et contrainte de cisaillement des superplastifiant SP 11, SP12, SP13	41
Figure 19. Rhéogramme de viscosité et contrainte de cisaillement des superplastifiant SP 14 et SP 15	42
Figure 20. Détermination d'étalement : a. remplissage du mini cône, b. exemple d'étalement,.....	45
Figure 21. Résultats d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant pour SP1 et SP2.....	47
Figure 22. Résultats d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant SP :3, 4, 5, 6, 7 et 8.....	47
Figure 23. Résultats d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant SP : 9,11,12,13,14 et 15..	48

Liste des tableaux

Tableau 1. Propriétés de différents types des ciments.....	9
Tableau 2. Enthalpies d'hydratation des phases du clinker.[7]	14
Tableau 3. Différentes classes des adjuvants : [9].....	19
Tableau 4. Analyses chimiques	32
Tableau 5. Composition minéralogique de ciment (CLINKER).....	32
Tableau 6.Caractéristiques physiques du ciment MATINE	32
Tableau 7.Résistance à la compression	33
Tableau 8.Quantité et le dosage nécessaire	35
Tableau 9.Analyse des résultats des essais sur viscosimètre.....	43
Tableau 10. Résultats d'étalement pour différentes superplastifiants	46
Tableau 11. Paramètres d'étalement de différentes superplastifiants.....	49

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le ciment est un matériau très important en Algérie comme dans le monde entier, pour la réalisation des bâtiments civils et industriels, des chaussées rigides et des ouvrages d'art. Il existe autant de variété de ciment (classes de ciments) que leur utilisation est multiple et nécessite des caractéristiques spécifiques en fonction de chaque usage. Les développements récents dans le domaine du ciment et béton montrent que l'incorporation conjuguée d'adjuvants fluidifiants conduit généralement à la réduction de la quantité d'eau nécessaire au gâchage et à l'augmentation conséquente de la compacité du matériau. Ainsi, des améliorations très significatives des performances mécaniques, physiques et de durabilité des bétons peuvent être obtenues en caractérisant une catégorie spécifique des matériaux que l'on appelle les bétons à hautes et à très hautes performances.

Une large gamme, depuis les années 60, des dispersants organiques appelés superplastifiants sont utilisés dans la formulation des bétons. Ces superplastifiants permettent d'améliorer les propriétés des bétons telles que la fluidité ou l'ouvrabilité tout en diminuant le rapport E/C. Les dispersants polymères les plus couramment utilisés sont des dérivés sulfonés : les lignosulfonates, naphthalènes sulfonates, polymélaaminesulfonates.....etc. Toutefois, la structure chimique de ces adjuvants est difficilement contrôlable. Depuis ces dix dernières années, une nouvelle famille de polymères, appelés polycarboxylates sont utilisés comme des superplastifiants avec différents ciments composés ; fera l'objet de notre étude sur la compatibilité ciment-superplastifiants sur un coulis de ciment à base de différents échantillons des superplastifiant de type polycarboxylates, formulés localement par une entreprise implantée dans le domaine des matériaux pour génie civil.

Les superplastifiants permettent en effet de défloculer les grains de ciment ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à leurs chaînes moléculaires très longues. Les connaissances théoriques relatives aux ciments et aux superplastifiants et nécessaires à la compréhension et exploitation des différents résultats des processus d'hydratation des phases cimentaires et du ciment Portland, ainsi que les propriétés rhéologiques de ces matériaux.

Ce mémoire est divisé en deux parties :

La première partie comporte les chapitres I et II

- **Chapitre I :**

Nous avons fait un rappel sur modes et techniques de fabrication des ciments portland, et leurs propriétés physico-chimiques, mécanique et minéralogiques et leur hydratation.

- **Chapitre II :**

Les super-plastifiants, leur mode d'action et leur adsorption sur les grains de ciment et la compatibilité ciment super-plastifiants.

La deuxième partie pratique est consacrée à l'étude expérimentale qui concerne la rhéologie et les suspensions des ciments.

Elle présente la stratégie adoptée pour cette étude et les principales caractéristiques physico-chimique des matériaux utilisés.

Nous avons aussi défini dans ce chapitre les différents paramètres étudiés pour la conception, ainsi que la description des essais effectués sur pâtes de ciment, et les interprétations des différents résultats expérimentaux obtenus, et leur influence.

A la fin, ce mémoire se termine par une conclusion générale qui rappelle les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LE

CIMENT

1.1. Introduction

L'industrie du ciment, dont le développement est considérable, surtout après la deuxième guerre mondiale, est un matériau de base fondamental et nécessaire à la performance et réduire son coût de fabrication.

D'autre part, cette industrie est également très polluante, relevant le défi d'améliorer les normes de qualité du ciment et de protection de l'environnement, ce qui fait de ces exigences des obligations incontournables.

Dans les équipements de production et de manutention d'une usine de ciment, 6 à 12 m³ d'air extrait et d'effluents gazeux par 1kg de produit doivent être aspirés et dépoussiérés.

Des technologies éprouvées sont mises en œuvre depuis des années pour réduire la pollution.

Dans les pays industrialisés, les coûts des installations visant à réduire les nuisances représentent jusqu'à 20% des investissements globaux d'une nouvelle cimenterie. A l'avenir, ce pourcentage est appelé à augmenter. [1]

Dans l'industrie du ciment, les principaux rejets vers l'atmosphère sont constitués essentiellement par les gaz de combustion au niveau des fours de cuisson mais surtout par les émissions des poussières à tous les niveaux de production du ciment (de l'extraction de la matière première au niveau des carrières jusqu'à l'ensachage du ciment). [2]

La pollution par les poussières représente la forme de pollution la plus importante au niveau des cimenteries. Elle est plus ressentie par la population pour des raisons physiologiques et psychologiques. La granulométrie des poussières est un facteur important. Les poussières fines restent en suspension dans l'atmosphère alors que les plus grosses sont appelées à se déposer sur le sol à différentes distances de la source selon leurs tailles.

1.2. Définition de ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral qui est sous forme de poudre finement broyée qui, gâché avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Les ciments courants constituent de clinker portland, d'autres constituants et des constituants dites secondaires (<5%) (dont le sulfate de calcium régulateur de prise). Selon la norme NF EN 197-1. [4]

1.2.1. Les constituants du ciment anhydre

i. Constituant principales

- Le silicate tricalcique (**alite**) **C3S** ;
- Le silicate bicalcique(**bélite**) **β -C2S** ;
- L'aluminate tricalcique **C₃A** ;
- Le ferroaluminatetétracalcique **C₄AF** ;
- Sulfate de calcium (anhydrite) CS. [5],[3]

ii. Constituants secondaires

Les constituants secondaires peuvent être :

- Soit l'un des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion ≤ 5 % exception faite du clinker ;
- Soit des fillers (F), leur teneur exacte et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse 3%.

Lorsque le constituant secondaire est un filler, il s'agit de poudres minérales très fines, généralement inertes mais pouvant par fois présenter des propriétés légèrement hydraulique ou pouzzolaniques. Ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment.[4]

a) Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium a pour effet de régler la prise du ciment. Le sulfate de calcium qui peut être du gypse, de l'anhydrite ou de l'hémi hydrate, doit être ajouté en faible quantité, c'est-à-dire de l'ordre de 3 à 5 % maximum.

b) Additifs

Les additifs ne doivent pas présenter des actions nocives sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques.

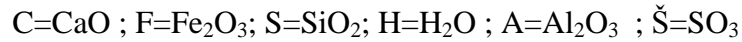
Il peut s'agir d'agents de mouture, fréquemment employé, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses extrêmement faibles.

Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortier, béton ou coulis.

La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne doit pas dépasser 0.5 % de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agent de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CHF-CEM III/A ou B et des CLK-CEM III/C, pour les quelles la proportion de sels chlorés (NaCl) est autorisée jusqu'à 1 %. [5]

1.2.2. Notation de la chimie des ciments

L'abréviation des oxydes et des minéraux qui sont très utilisés dans la chimie des ciments diffère à celle de la chimie classique pour faciliter les différents calculs, on distingue :



1.3. PROCESSUS DE FABRICATION DES CIMENTS COURANTS

Le ciment Portland est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux CaO avec la silice SiO₂, l'alumine Al₂O₃ et l'oxyde de fer Fe₂O₃.

Les matières premières nécessaires à sa fabrication sont le calcaire et l'argile. La chaux est apportée par les roches carbonatées ; l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par les argiles. Ces matériaux sont extraits en carrières, concassés, broyés, finement moulus, homogénéisés et mélangés dans des proportions bien définies. Le mélange obtenu est appelé le cru de ciment et est composé d'environ 80 % de carbonate de calcium et de 20 % de silice, alumine et oxyde de fer. Il est introduit dans un four rotatif incliné et chauffé à une température de 1400 à 1500°C sous une atmosphère oxydante. Au cours de la cuisson, les matières premières vont réagir entre elles pour former au final un matériau de composition complexe : le clinker. Les processus chimiques à haute température conduisant à la formation de ce produit sont :

- La déshydratation des minéraux,
- La conversion du calcaire en chaux par décarbonatation :



- Les réactions de clinkérisation :

La chaux libérée précédemment réagit sur les éléments argileux pour former les silicates, les aluminates et les ferroaluminates de calcium. Il y a frittage des silicates et réaction par l'intermédiaire du fondant produit par les aluminates.

A 1450°C, le clinker consiste en une phase interstitielle fondue, laquelle va produire principalement la phase aluminate et la phase ferroaluminate, et des phases solides frittées, l'alite et la bélite. Il contient également des oxydes mineurs, tels que l'oxyde de magnésium, le dioxyde de titane, le dioxyde de manganèse, l'oxyde de potassium et l'oxyde de sodium.

Leurs teneurs sont de quelques pourcents par rapport à la masse du clinker. Le terme « mineur » se réfère principalement à leurs teneurs et non à l'influence qu'ils peuvent avoir sur les propriétés du ciment. [6]

A la fin de la cuisson, le clinker est trempé et refroidi ainsi dans la composition d'équilibre en phases réactives. Les teneurs des différents minéraux dépendent de la composition des matières premières et des conditions de chauffage et de refroidissement. Les proportions typiques des différents oxydes constitutifs d'un clinker sont : 67 % de CaO, 22 % de SiO₂, 5% d'Al₂O₃, 3 % de Fe₂O₃ et 3 % d'autres composants comme MgO, Na₂O, K₂O...

Le clinker est ensuite broyé et mélangé avec des sulfates de calcium et/ou des sulfates alcalins jusqu'à 8 % massique pour former le ciment Portland.

La production de ciment demande une grande quantité d'énergie (environ 3400 kJ pour 1 kg de ciment) majoritairement issue de la combustion d'énergies fossiles. Il est donc intéressant de remplacer une partie du clinker par des coproduits industriels moins coûteux et moins consommateurs en énergie. Ces additions sont définies par la norme européenne NF EN 197-1 comme des matériaux minéraux finement divisés utilisés dans le ciment afin d'améliorer certaines propriétés ou lui conférer des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions minérales selon leur réactivité :

- Les additions peu réactives : fillers, pigments, additions calcaires, additions siliceuses ;
- Les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent : cendres volantes, fumées de silice, laitiers de haut fourneau.

Il existe donc différents types de ciments Portland selon qu'ils contiennent ou non des additions minérales, et si oui, de la nature de ces additions. Les ciments Portland, notés CEM, sont classés selon cinq types, définis selon la norme Européenne EN 197 – 1 :

- CEM I : Ciments Portland ;
- CEM II : Ciments Portland composites ;
- CEM III : Ciments de haut fourneau ;
- CEM IV : Ciments pouzzolaniques ;
- CEM V : Ciments composites.

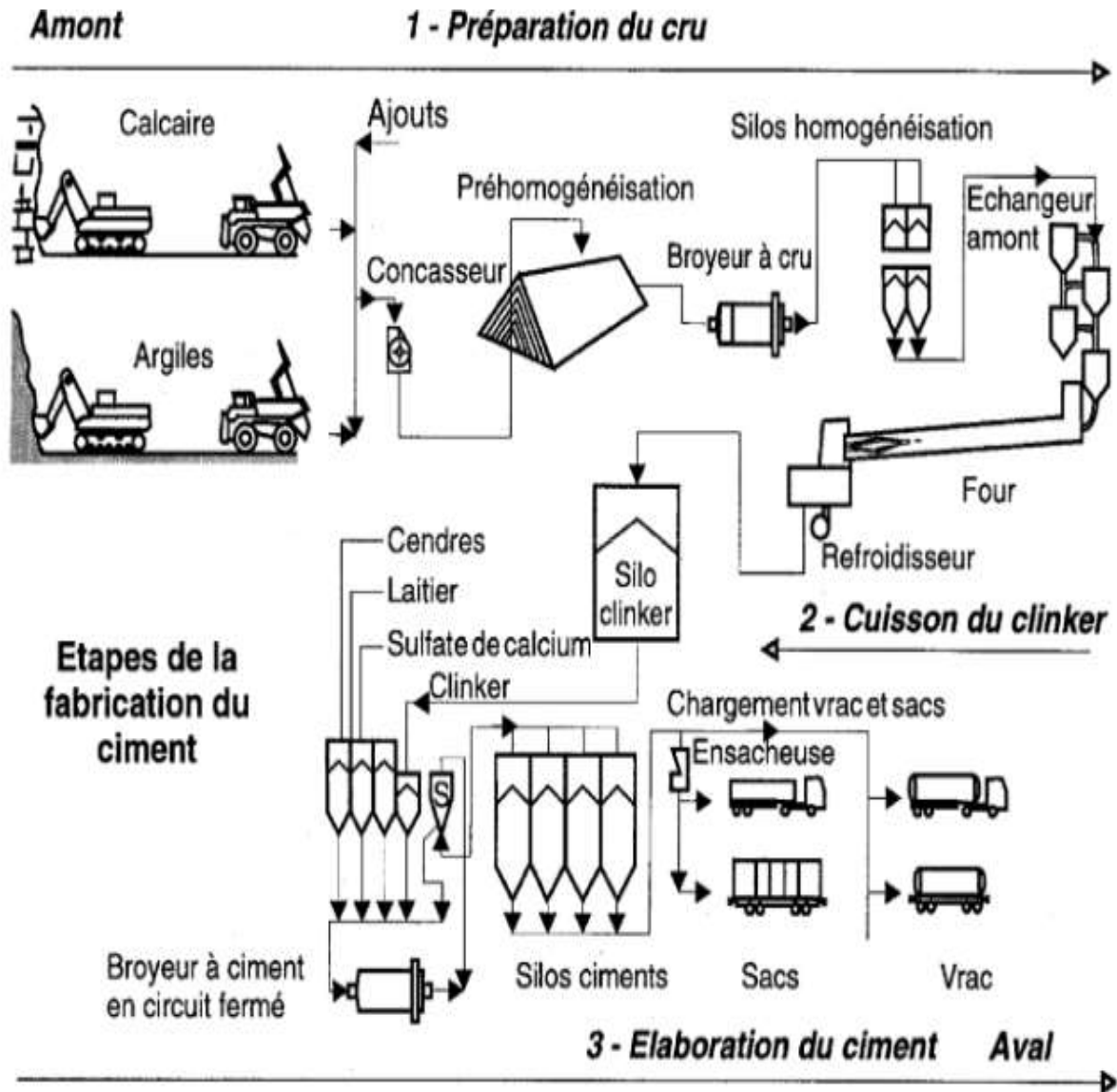


Figure 1. Fabrication du ciment

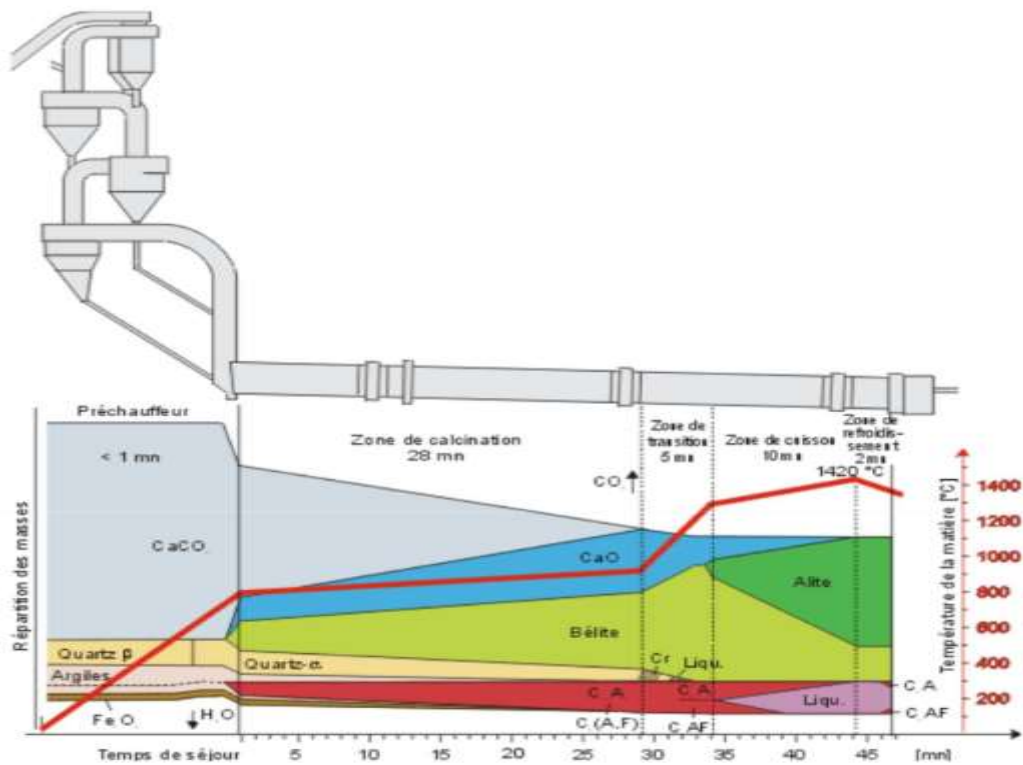


Figure 2. Evolution des températures à l'intérieur du four et formation des minéraux.

1.4. PROPRIETES DE CIMENT

I.4.1 Propriétés chimiques

I.4.1.1. Composition chimique des ciments

D'une façon générale, les ciments doivent satisfaire au respect d'un certain nombre d'exigences, quant à leur composition chimique.

La composition chimique des ciments doit être selon les normes comme suite :

- 65% de CaO fourchette de 60 à 69% ;
- 21% de SiO₂ fourchette de 18 à 24% ;
- 6% d'Al₂O₃ fourchette de 4 à 8% ;
- 3% de Fe₂O₃ fourchette de 1 à 8% ;
- 2% de MgO fourchette de 0 à 5% maximum ;
- 1% d'alcalis fourchette de 0 à 2% maximum ;
- 1% de SO₃ fourchette de 0 à 3% maximum ;

Avec une fourchette de sulfate de calcium (CaSO₄, 2H₂O) compris entre 3 à 5 %.

Les exigences les plus importantes à respecter sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1. Propriétés de différents types des ciments

Propriété	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale en % de la masse
Perte au feu	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes classes	≤ 5
Oxyde de magnésium MgO	CPA-CEM I	Toutes classes	≤ 5
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes classes	≤ 5
Sulfate SO ₃ Limite supérieure	CPA-CEM I	32.5	≤ 3.5
	Et	32.5 R	
	CPJ-CEM II (*)	42.5	
	CPZ-CEM IV	42.5	≤ 4
Et	52.5	≤ 4	
CLC-CEM V	52.5 R		
CHF-CEM III	Toutes classes		
Chlorures	Touts type de ciment (**)	52.5 R	≤ 0.05
		Toutes les autre classe	≤ 0.10

²(*) Valable pour les CPJ-CEM II/A et B à l'exception des ciments ne contenant que des schistes calcinés comme constituant, autre que le clinker, pour lesquels la limite est de 4.5 % pour toutes les classes de résistance.

(**) Les CHF-CEM II/A et B et les CLK-CEM III/C peuvent contenir plus de 0.10 % de chlorures mais dans ce cas la teneur doit être déclarée.

I.4.1.2. Compositions minéralogiques du clinker

a. Silicate tricalcique, (l'alite) C₃S

Le silicate tricalcique se distingue par les propriétés suivantes :

- Comprend toutes les caractéristiques essentielles du ciment Portland ;
- Prise initiale et finale en l'espace de quelques heures après le gâchage ;
- Développement de la plupart de sa résistance en sept jours ;
- Les mélanges de silicate tricalcique et d'eau sont moins plastiques que le ciment portland (demandent plus d'eau pour obtenir une pâte plastique). Le mélange peut être amélioré par une addition de gypse.

b. Silicate bi calcique, C₂S

Le silicate bicalcique se distingue par les propriétés suivantes :

- Aucun temps de prise définitif, la pâte gâchée prend lentement pendant une période de quelques jours ;
- L'addition de gypse ne donne que peu de changement ;
- Peu de résistance en début de prise, mais gagne sûrement en résistance en fin de prise jusqu'à ce qu'il y ait égalité avec le C₃S.

c. Aliménte tricalcique, C₃A

- Prise Flash (pratiquement instantanée) après gâchage à l'eau, accompagnée d'un tel dégagement de chaleur qu'une évaporation violente est visible.
- Après malaxage ultérieur: pâte plastique et facile à travailler.
- Dans de l'air humide: durcissement et résistance convenables.
- Dans l'eau: désintégration et émiettement.
- Un temps de prise normal s'obtient par l'addition de 5% de gypse.
- Produit une certaine résistance en une journée, mais aucun développement subséquent n'est visible.
- L'influence de ce composé dans les mélanges semble être irrégulière.

d. Ferroaluminatetétracalcique, C₄AF

- Hydratation rapide.
- Contribution incertaine à la résistance.
- Prise en quelques minutes mais sans prise Flash comme pour le C₃A.
- Dégagement de chaleur marqué accompagne la prise, cependant moins vigoureux que pour le C₃A.

I.4.2. Propriétés physiques**a. Délais de prise**

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié aux nombreux paramètres :

- Le type du ciment
- La finesse de mouture, le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande ;

- La température ambiante, la prise étant stoppée à 0°, alors qu'elle est très accélérée lorsque la température dépasse 30°C ;
- La présence de la matière organique dans l'eau ;
- L'excès d'eau de gâchage qui agit comme retardateur.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales. L'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3h 30 pour la grande majorité des ciments ces valeurs s'étendent pour une température ambiante de 20°C.

b. Durcissement

Une fois la prise amorcée le phénomène d'hydratation se poursuit ; c'est la période de durcissement qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent d'accroître.

c. Phénomène de fausse prise

Dans la composition des ciments rentre en général un peu de gypse (sulfate de calcium) hydraté à deux molécules d'eau : $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Si le clinker est trop chaud ou s'échauffe trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre [$\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$].

Dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est «la fausse prise», dans ce cas il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage. Les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse.

d. Chaleur d'hydratation

La dissolution des différents constituants est exothermique, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C_3A que l'on cherchera à utiliser par temps froid ou en préfabrication, alors qu'on aura intérêt à les éviter par temps chaud. Suivant les ciments, cette chaleur à 12 heures, est approximativement de 300j/g.

e. Finesse de mouture

La finesse de mouture. Également appelée finesse Blaine, exprimée en m^2/kg . Représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1 kg de ciment. Elle est, d'une façon générale, comprise entre 300 et 350 (pour mémoire rappelons que la finesse s'exprimait auparavant en cm^2/g et que de nombreux utilisateurs continuent à l'exprimer ainsi ; il ressort qu'une finesse de 300 m^2/kg correspond à 3000 cm^2/g). Plus la finesse est grande plus les

résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'éventement du ciment sont accrus.

f. Retrait

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16cm de longueur et d'une section droite (4 x 4) cm², conservées dans l'air à une température de 20 °C et une hygrométrie de 50 %.

La norme impose la valeur limitée de retrait pour le CPA - CEM I de 800 µm /m.

g. Expansion

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie.

Les ciments doivent être stables ; car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

La stabilité se détermine par l'essai le Chatelier, qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaires d'un moule rempli de la pâte de ciment à tester, et conservé dans l'eau bouillante la valeur de l'expansion mesurée doit être inférieure à 10mm pour tous les types de ciments courant.

h. Gonflement

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ le 1/10^e de celles constatées dans l'air.

i. Le besoin d'eau

Le besoin d'eau du ciment est une quantité minimale d'eau qui assure l'obtention d'une pâte du ciment ayant d'une viscosité donnée, cette quantité d'eau varie de 24% à 28% de la masse de ciment, le besoin d'eau dépend de plusieurs facteurs :

- La composition minéralogique.
- La finesse de mouture.
- La présence d'addition.

j. Durée de conservation

La conservation des ciments pendant un court temps, même dans les conditions les plus favorables, entraîne une perte d'activité qui est liée à la carbonatation et l'hydratation partielle des minéraux de clinker en trois mois la perte d'activité de ciment peut atteindre de 15÷20% et en une année de 40%. La finesse du ciment influe aussi sur la stabilité, un ciment ayant une grande finesse de mouture est plus mauvaise en termes de stabilité, cette dernière pendant la conservation peut être augmenté avec l'introduction dans le ciment lors du broyage de certaines substances hydrophobes en quantité de 0,06 ÷ 0,30% de la masse totale de ciment rapporté à la substance sèche de l'adjuvant en quantité d'adjuvant hydrophobes on utilise le savon naphthénique - acide naphthénique.

I.4.3 Les propriétés mécaniques

C'est la propriété la plus importante elle est évaluée par les limites à la rupture par compression, flexion, traction. D'après les normes AFNOR, la classe de résistance d'un ciment s'étale d'après la limite de résistance à la rupture par flexion et par compression d'éprouvette de (40*40*160) mm d'un mortier plastique de composition (1/3) et soumise aux essais après 28 jours de conservation dans des conditions d'humidité 90 % et de température $t^{\circ}=20C^{\circ}$.

I.5 Hydratation de ciment

L'hydratation du ciment réunit l'ensemble des réactions dans lesquelles l'eau se lie aux différents composés du ciment pour former des hydrates. Le ciment est un liant hydraulique, ce qui signifie que son hydratation peut avoir lieu indifféremment dans l'air ou dans l'eau. Cette propriété remarquable vient du fait que les hydrates sont quasiment insolubles dans l'eau. [6]

L'hydratation du ciment provoque le durcissement de la pâte de ciment, suspension fluide ou plastique, laquelle va se transformer en un matériau solide et résistant. On peut alors parler d'une « pierre de ciment », véritable roche artificielle mais qui évolue dans le temps et suivant les conditions de température et d'humidité environnantes. Ce processus de durcissement se divise en deux étapes : la prise et le renforcement.

La formation des hydrates commence immédiatement après l'addition de l'eau dans le ciment. Un léger raidissement est alors observé, lequel va se renforcer au cours du temps.

Lorsque ce raidissement atteint une certaine valeur, il y a prise du ciment. Le matériau n'a cependant pas encore de résistance mécanique et ne peut donc pas supporter de charges. Le

début de prise correspond à une augmentation brusque de la viscosité accompagnée d'une élévation de température et dure généralement quelques heures. Lorsque la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un bloc rigide, c'est la fin de prise. La prise est dirigée chimiquement par l'hydratation de la phase aluminatée en présence d'ions sulfate.

L'hydratation continue progressivement et permet le développement de la structure mécaniquement résistante du matériau. Le renforcement de la pierre de ciment est lié à la formation de produits capables de supporter des charges. L'évolution des caractéristiques physiques ou mécaniques, très rapide dans les heures qui suivent la prise, continue pendant plusieurs mois mais de plus en plus lentement. L'hydratation des silicates est chimiquement responsable du durcissement.

En raison de cet ensemble de propriétés, le ciment est un matériau idéal pour des applications dans le domaine de la construction.

Afin d'expliquer au mieux le processus d'hydratation du ciment Portland, les réactions d'hydratation de chacune des phases du clinker, prises une à une, sont d'abord expliquées.

Les phénomènes physico-chimiques mis en jeu et les différents hydrates formés au cours de l'hydratation d'un ciment sont ensuite rigoureusement décrits.

I.5.1 Hydratation des phases du clinker

Les quatre phases du clinker présentent des réactivités très différentes lors de leur hydratation comme l'indiquent les valeurs d'enthalpie d'hydratation réunies dans le tableau suivant :

Tableau 2. Enthalpies d'hydratation des phases du clinker.[7]

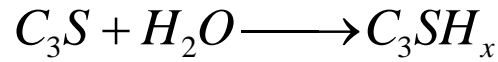
Composé	Enthalpie d'hydratation molaire (kJ/mol)	Enthalpie d'hydratation massique (J/g)
C3S	-130	-569
C2S	-45	-261
C3A	-242	-896
C4AF	-208	-428

Chacune des phases du clinker mène à des produits d'hydratation spécifiques au cours de différentes réactions chimiques. Les mécanismes d'hydratation des C₃S et C₂S sont semblables, l'hydratation des C₃A et C₄AF sont aussi semblables.

I.5.2 Hydratation des constituants principaux de clinker

a) Silicate tricalcique (C_3S)

Le silicate tricalcique réagit rapidement avec l'eau suivant la réaction :



Le produit étant sous forme de gel et enrobent les grains de C_3S pour arrêter son hydratation.

Ce premier hydrosilicate se compose entre 2 à 6 heures, d'hydratation de manière à dégager le portlandite et l'hydrosilicate de faible basicité.



Ce dernier se combine avec l'hydroxyde de calcium (portlandite) à travers la solution aqueuse pour donner le CSH cristallisé sous formes de fibres.

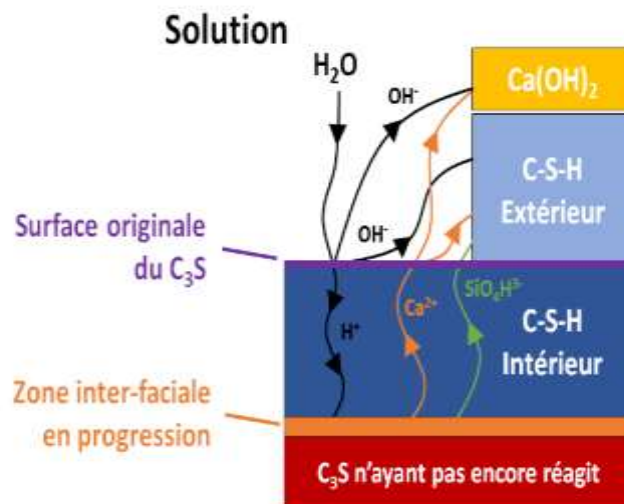
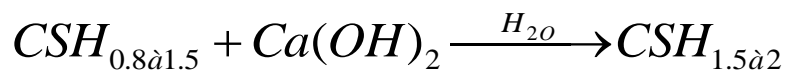


Figure 3. Représentation schématique proposée par Taylor de la réaction du C_3S avec l'eau[8]

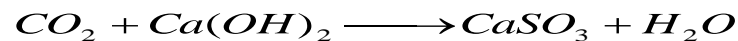
b) Le silicate bi calcique (C₂S)

Le C₂S donne les mêmes produits que le C₃S, à savoir des CSH et de la portlandite, mais la proportion de portlandite est plus faible compte tenu du rapport C/S plus faible dans C₂S que dans C₃S, la séquence des réactions d'hydratation de C₂S est analogue à celle du C₃S, mais toutes les réactions sont plus lentes.



La portlandite est un élément nocif apparaît sous forme de cristaux et leur forme de larges feuillets hexagonaux.

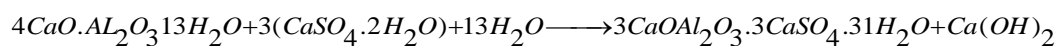
Donc le portlandite il peut se combiner avec CO₂ de l'atmosphère selon le mécanisme suivant :

**c) L'aluminate tricalcique (C₃A) et le gypse**

En présence d'ions sulfate, l'hydratation de l'aluminate tricalcique devient très rapide et formerait des aluminates hydratés qui bloqueraient l'hydratation des autres constituants et surtout rendraient le béton non utilisable, en présence de gypse cette réaction est remplacée par une réaction lente, d'où l'appellation de régulateur de prise pour ce composant.

Dès le malaxage, le C₃S et le gypse se dissolvent rapidement et la solution devient sursaturée. Les ions se combinent pour créer des cristaux d'ettringite ou sel de Candlot, (trisulfoaluminate de calcium hydraté). Ce composé est généralement bien cristallisé et apparaît sous forme d'aiguilles très fines ou sous forme d'oursins caractéristiques.

Donc C₃A se transforme en hydrosulfoaluminatetétracalcique suivant la réaction :

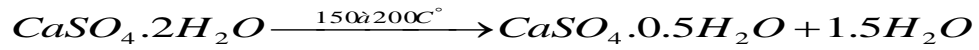
**d) Aluminoferritetétracalcique (C₄AF)**

Le C₄AF possède une séquence réactionnelle voisine de celle de C₃A, avec une vitesse quatre à cinq fois plus faible.

En générale, il faut attendre l'épuisement du gypse pour observer un taux de réaction significatif de C₄AF.

❖ La fausse prise

Dans la composition des ciments rentre en général un peu de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre selon la réaction suivant :



Dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la «fausse prise», dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage. Les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou assez fort pourcentage de gypse.

CHAPITRE II

LES SUPERPLASTIFIANTS

II. Introduction

Pour renforcer la qualité des bétons, en fonction de leur utilisation et des qualités demandées, il est nécessaire d'y ajouter des produits soit naturels, soit chimiques, pour améliorer leurs capacités.

II.1. Définition l'adjuvant

L'adjuvant est un produit ajouté en très faible quantité aux bétons, mortiers ou coulis, avant ou pendant le malaxage. La dose est inférieure à 5% du poids du ciment. [9]

Le but est d'améliorer certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais pendant la prise et le durcissement, ou à l'état durci.

Les adjuvants font l'objet de la norme NF EN 934, partie 2 (adjuvants pour béton, mortier et coulis).

Chaque adjuvant, même s'il a plusieurs actions secondaires, est défini par sa fonction principale : la ou les modifications majeures apportées aux bétons, comme l'état frais et/ou durci.

Techniquement parlant, ce sont des substances chimiques organiques ou inorganiques qui, ajoutées aux bétons, mortiers ou coulis, modifient :

- La rhéologie ;
- La cinétique d'hydratation (temps de pris et de durcissement) ;
- Les performances mécaniques.

L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier selon son dosage et sa compatibilité avec les matériaux utilisés.

II.2. Utilités

L'adaptation du béton aux exigences technologiques et ambiantes d'un chantier (temps chaud, temps froid, gel...etc) a montré les limites de ce matériau. Il est parfois impossible, compte tenu des constituants disponibles (ciment, granulats), de trouver une formulation de béton qui puisse, soit convenir aux problèmes de bétonnage posés sur chantier, soit s'adapter à certaines techniques modernes. [9]

Les adjuvants peuvent être :

- Des substances chimiques organiques (plastifiants, plastifiants-réducteurs, fluidifiants, entraîneurs d'air) ;
- Des substances inorganiques (accélérateurs de prise et de durcissement).

Ils permettent simultanément de :

- Modifier la rhéologie des bétons avec des teneurs en eau nettement inférieures aux bétons non adjuvantés ;
- Accélérer ou retarder la prise, selon les exigences ambiantes du chantier ;
- Ces qualités justifient qu'ils soient considérés comme l'un des constituants du béton au même titre que les éléments de base (ciment, granulats, eau et air occlus) et donc comme un cinquième élément à part entière.

Parmi d'autres avantages, ils permettent :

- D'optimiser le rapport qualité/prix lors de la formulation des bétons ;
- D'étendre la gamme d'utilisation des bétons.

Si ces produits offrent des moyens supplémentaires pour améliorer les caractéristiques de la qualité du béton, ils n'apportent aucune solution valable à une mauvaise formulation de béton ou à une mise en œuvre déficiente.

II.2.1. Classification des adjuvants est basée sur leur fonction principale

- Plastifiant ;
- Plastifiant-réducteur d'eau ;
- Fluidifiant ;
- Entraîneur d'air.

Un adjuvant commercial peut être un produit (pur) ou un mélange de plusieurs produits permettant la réalisation d'un compromis acceptable.

Tableau 3. Différentes classes des adjuvants : [9]

Adjuvants	Propriétés	Prescriptions complémentaires
Plastifiant Réducteur d'eau	Réduction d'eau	Pour le béton adjuvanté : $\geq 5\%$ par rapport au béton témoin
	Résistance à la compression	À 7 jours et à 28 jours : béton adjuvanté $\geq 110\%$ du béton témoin
	Teneur en air du béton frais	Pour le béton adjuvanté : $\geq 2\%$ en volume au-dessus de celle du béton témoin, sauf indication contraire du fabricant (à consistance égale)
Superplastifiant Haut réducteur d'eau	Réduction d'eau	Pour le béton adjuvanté : $\geq 12\%$ par rapport au béton témoin
	Résistance à la compression	À 1 jour : béton adjuvanté $\geq 140\%$ du béton témoin À 28 jours : béton adjuvanté $\geq 115\%$ du béton témoin
	Teneur en air dans le béton frais	Pour le béton adjuvanté : $\geq 2\%$ en volume au-dessus de celle du béton témoin, sauf indication contraire du fabricant (à consistance égale)
	Augmentation de la consistance	Augmentation de l'affaissement ≥ 120 mm par rapport aux (30 ± 10) mm initiaux Augmentation de l'étalement ≥ 160 mm par rapport aux (350 ± 20) mm initiaux

	Maintien de la consistance	30 min après l'ajout, la consistance du béton adjuvanté ne doit pas tomber en dessous de la valeur initiale de la consistance du béton témoin
	Résistance à la compression	À 28 jours : béton adjuvanté ≥ 90 % du béton témoin
	Teneur en air dans le béton frais	Pour le béton adjuvanté : < 2 % en volume au-dessus de celle du béton témoin, sauf indication contraire du fabricant (à rapport <i>E/C</i> égal)
Rétenteur d'eau	Ressuage	Pour le béton adjuvanté : < 50 % de celui du béton témoin
	Résistance à la compression	À 28 jours : béton adjuvanté ≥ 80 % du béton témoin d'eau
	Teneur en air du béton frais	Pour le béton adjuvanté : < 2 % en volume au-dessus de celle du béton témoin, sauf indication contraire du fabricant (à consistance égale)
Entraîneur d'air	Teneur en air du béton frais	Facteur d'espacement dans le béton adjuvanté : $< 0,200$ mm
	Caractéristiques des vides d'air dans le béton durci	À 28 jours : béton adjuvanté ≥ 75 % du béton témoin (à consistance égale)
	Résistance à la compression	À 20 °C : pour le mortier adjuvanté : ≥ 30 minutes À 5 °C : pour le mortier adjuvanté : < 60 % de celui du mortier témoin
Accélérateur de prise	Temps de début de prise	À 20 °C : pour le mortier adjuvanté : ≥ 30 minutes À 5 °C : pour le mortier adjuvanté : < 60 % de celui du mortier témoin
	Résistance à la compression	À 28 jours : béton adjuvanté ≥ 80 % du béton témoin À 90 jours : béton adjuvanté \geq au béton adjuvanté à 28 jours
	Teneur en air du béton frais	Pour le béton adjuvanté : < 2 % en volume au-dessus de celle du béton témoin, sauf indication contraire du fabricant (à consistance égale)
Accélérateur de durcissement	Résistance à la compression	À 20 °C et 24 heures : béton adjuvanté > 120 % du béton témoin À 20 °C et 28 jours : béton adjuvanté > 90 % du béton témoin À 5 °C et 48 heures : béton adjuvanté > 130 % du béton témoin

II.3. Supersplastifiants

II.3.1. Définition

Les super-plastifiants sont des polymères solubles dans l'eau, lesquels possèdent de nombreuses applications dans l'industrie de la construction. Ces matériaux sont également appelés réducteurs d'eau de haut rang. Ils font partie des adjuvants pour béton, lesquels sont définis, selon la norme EN 934-2, comme des matériaux qui sont ajoutés au béton pendant le processus de malaxage, dans des quantités inférieures à 5% de la masse de ciment, afin de modifier ses propriétés à l'état frais et à l'état durci. [6]

II.3.2. Les différentes classes de super-plastifiant

Les super-plastifiants sont classés en deux catégories selon la nature du groupement anionique, la première est composée des polymères contenant des fonctions sulfonates-SO₃ et la deuxième des polymères munis des fonction carboxylate-COO⁻.

II.3.2.1. Super-plastifiant à base de sulfonates

Ces matériaux sont des polymères anioniques des groupes sulfonates SO₃ à intervalles réguliers

Il existe trois principaux types de super-plastifiant à base de sulfonates :

- Lignosulfonates modifiés LSM ;
- Polynaphtalènesulfonates PNS ;
- Polymélamines sulfonates PMS.

II.3.2.2. Superplastifiant à base de carboxylates

Les super-plastifiants à base de poly-carboxylates ont été mis au point après les polysulfonates et sont pour cette raison communément appelés super-plastifiant de nouvelle génération.

II.3. Mode d'action de super-plastifiant

La dispersion des particules de ciment par les super-plastifiants conduit à une évolution des propriétés rhéologiques des pâtes et mortiers de ciment, et l'action d'un super-plastifiant passe nécessairement par son adsorption sur les grains de ciment.

Les grains de ciment ont alors tendance à s'éloigner les uns des autres du fait qu'ils ont tous la même charge et s'entourent d'un film d'eau très mince. [6] [10]

Ainsi on obtient un grain de fluidité, puisque les grains de ciment sont mieux dispersés. L'eau existante sert alors de fluidifier le béton.

Dans certains cas, l'ajout des super-plastifiants est directement additionné dans la toupie du camion afin d'éviter une perte de fluidité pendant le trajet.

Le super-plastifiant est ajouté dans le béton puis malaxé pendant 3 minutes dans la toupie à vitesse maximum. Il suffit de reconnaître que les adjuvants en général et les super-plastifiants en particulier, s'ils sont bien utilisés, sont des constituants essentiels pour des bétons durables. Il est possible enfin de confectionner des bétons imperméables et résistants aux agents chimiques grâce aux adjuvants et un rapport E/C très bas (≤ 0.35).

Bien sûr, il ne faut pas aussi négliger le temps de mûrissement d'un béton.

Cette étape est aussi importante que la confection du béton lui-même.

Nous verrons plus loin les moyens et les méthodes utilisés pour la protection des bétons frais.

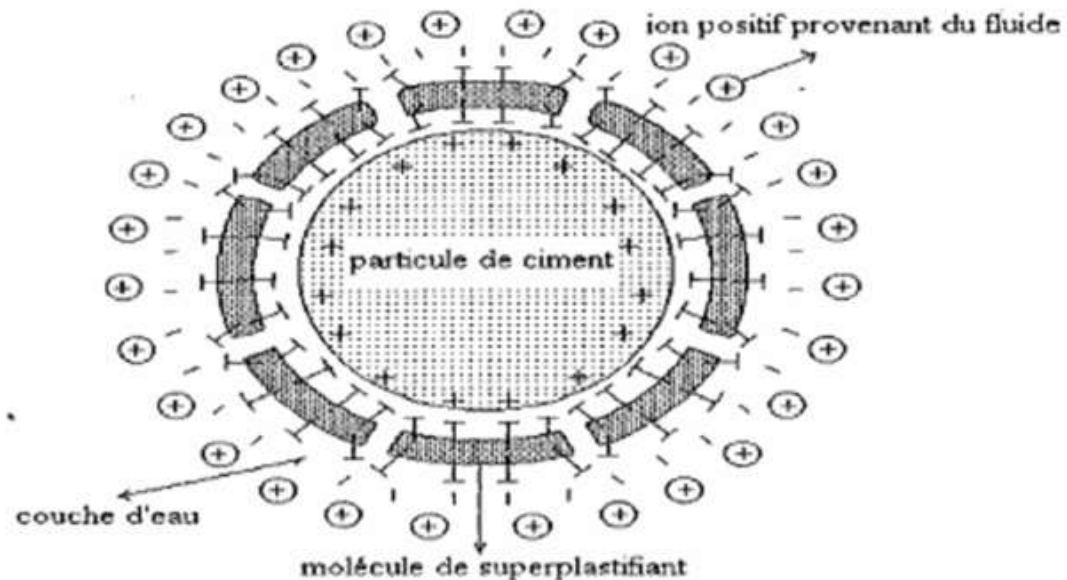


Figure 4. Mode d'action d'une molécule de super-plastifiants

II.4. Synthèse des polycarboxylate

Les poly-carboxylates sont synthétisés par une polymérisation radicalaire à partir de monomères acryliques. Aussi ces matériaux sont encore connus sous le nom de polyacrylates. La synthèse de ces polymères comprend trois étapes différentes, lesquelles seront résumées à la figure (5).

1. Initiation

La réaction radicalaire est initiée à partir d'un radical libre, appelé initiateur, lequel réagit avec un acide acrylique pour former un radical acrylique. Les peroxydes, comme $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, sont les plus communément utilisés à cet effet. La quantité d'initiateur utilisée détermine la masse molaire moyenne du polymère final. Plus sa concentration est élevée, plus la masse molaire moyenne du polymère est faible[4]

2. Propagation

Le radical acrylique libre réagit avec un autre monomère pour former un radical dimère, lequel réagit à nouveau avec un monomère pour former un radical trimère, et ainsi de suite.

3. Terminaison

La propagation peut être stoppée par recombinaison : deux radicaux vont réagir entre eux pour former une seule molécule de polymère.

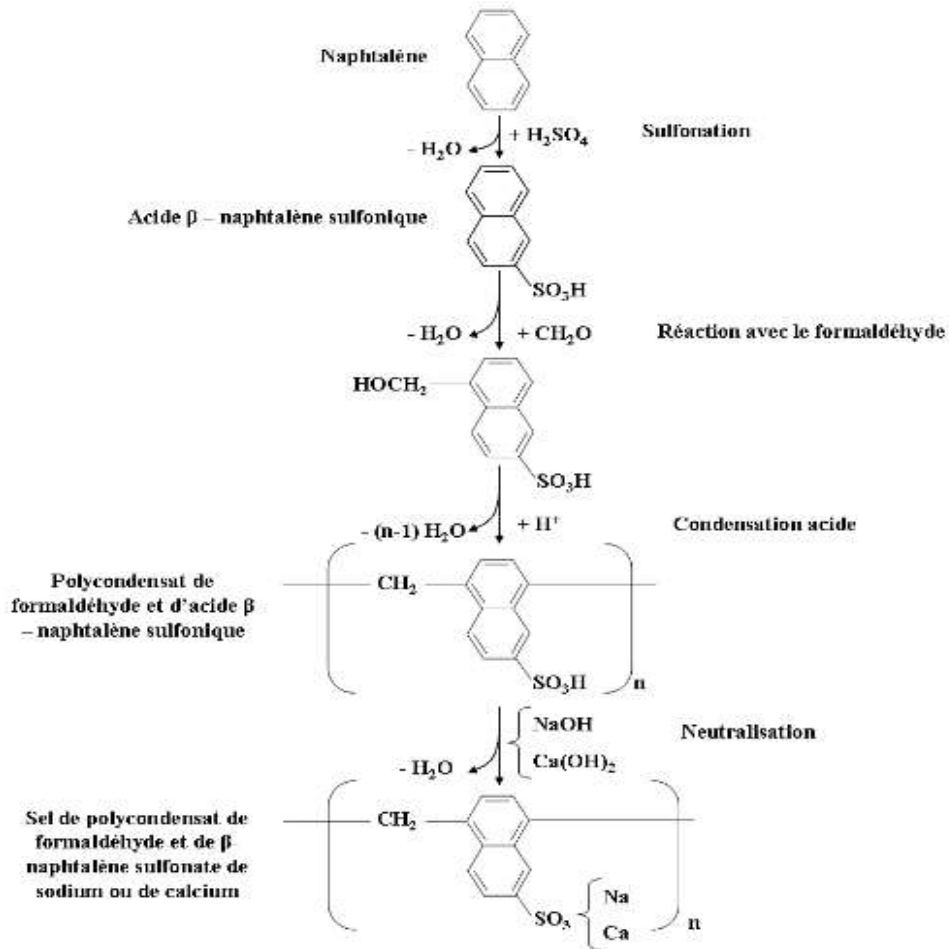


Figure 5.Synthèse de polycarboxylate

II.5.Effet des superplastifiants sur l'hydratation du ciment

La fluidification des bétons frais par les super-plastifiants peut être expliquée par la dispersion des grains de ciments. Les super-plastifiants sont considérés actuellement comme de puissants dispersants. Ils permettent d'éviter l'agglomération des particules de ciment et de libérer l'eau emprisonnée dans ces agglomérats.

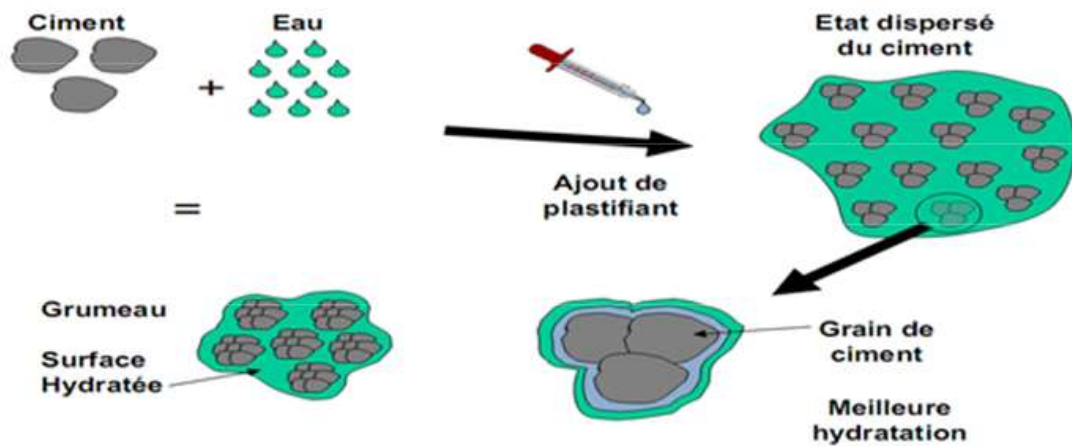


Figure 6. Effet de superplastifiant sur le ciment.

II.6. Comportement rhéologique des systèmes superplastifiant-ciment :

Ces matériaux sont également appelés réducteurs d'eau de haut rang. Ils font partie des adjuvants pour béton, lesquels sont définis, selon la norme EN 934-2, comme des matériaux qui sont ajoutés au béton pendant le processus de malaxage, dans des quantités inférieures à 5% de la masse de ciment, afin de modifier Les super-plastifiants sont des polymères solubles dans l'eau, lesquels possèdent de nombreuses applications dans l'industrie de la construction, ses propriétés à l'état frais et à l'état durci. [11]

En l'absence de super-plastifiant, 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 super-plastifiant, 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 3 reprend les effets des super-plastifiants sur les propriétés rhéologiques d'une pâte de ciment. [12] [13]

La structure des superplastifiants de type polycarboxylate a une influence décisive sur leur pouvoir fluidifiant. Les recherches de Yamada et al ont montré que de longues chaînes secondaires conduisent, en général, à une fluidité plus grande et à une diminution de la viscosité plastique et du seuil d'écoulement. Par contre, un allongement de la chaîne principale a un effet négatif sur la fluidité. Il semble que ces effets s'expriment surtout pour de faibles rapports E/C. Enfin, la concentration en super-plastifiant est déterminante en ce qui concerne la stabilité des mélanges cimentaires. En effet, au-delà d'une concentration critique,

les particules de ciment et les granulats sédimentent en raison de l'absence de seuil d'écoulement.

Les super-plastifiants s'adsorbent à la surface des grains de ciment de la même manière quelle que soit leur nature. Par contre, la répulsion qu'ils engendrent une fois adsorbés diffère selon le type de polymère. Les superplastifiants de type poly-sulfonate agissent par une interaction électrostatique et ceux de type poly-carboxylate par un encombrement stérique. Dans les deux situations, la dispersion des particules se traduit par une amélioration des caractéristiques rhéologiques de la pâte de ciment. De nombreuses applications technologiques vont découler de cette propriété.

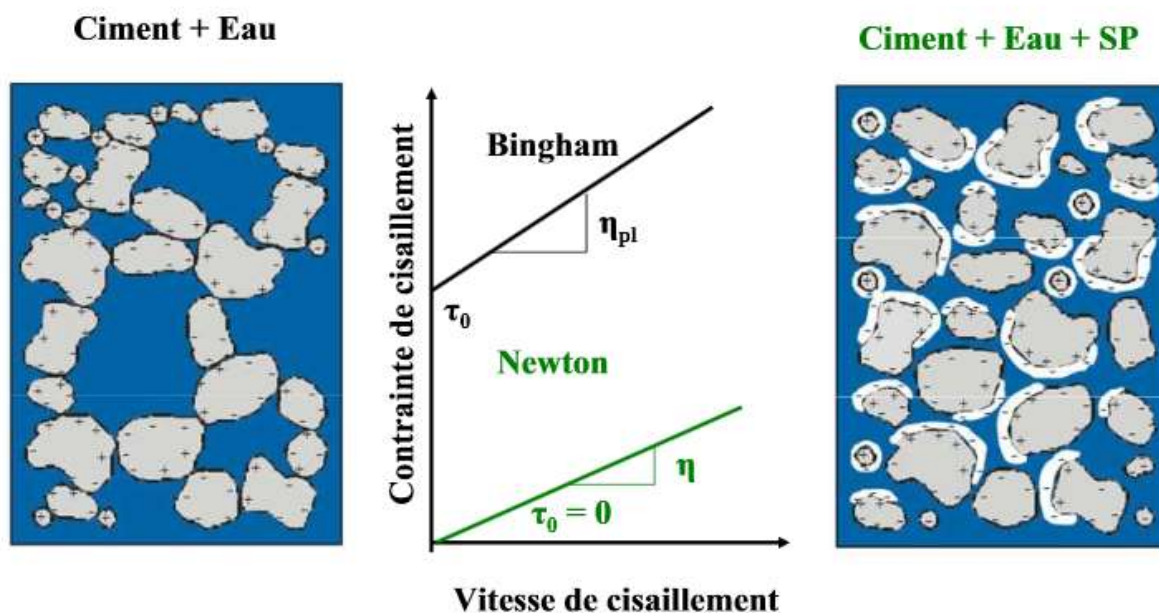


Figure 7. Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.

II.7. CONCLUSION

A l'issue de cette étude bibliographique, qui constitue une restitution des caractéristiques connues des matériaux entrant dans la composition des combinaisons ciment/superplastifiant, les points suivants peuvent être soulignés : Dans une pâte de ciment, le liant inorganique réagit avec l'eau. La réaction d'hydratation consiste en une succession de périodes caractéristiques du ciment. Le début de l'hydratation est délimité par la période de pré-induction, au cours de laquelle le ciment réagit vivement avec la phase aqueuse, et la période d'induction, pendant laquelle le système est dans une phase de latence. Le produit d'hydratation principalement formé pendant cet intervalle de temps est l'ettringite, produit de

la réaction du C3A avec l'eau en présence de sulfate de calcium. Cet hydrate forme une couche protectrice à la surface des grains de ciment, laquelle isole les produits anhydres de l'eau interstitielle et modère les processus d'hydratation.

Au début de l'hydratation, la pâte de ciment est un fluide viscoélastique, défini par un seuil d'écoulement et une viscosité plastique. Ces grandeurs rhéologiques évoluent avec l'avancement de l'hydratation et le fluide viscoélastique se transforme progressivement en un solide viscoélastique. Les caractéristiques rhéologiques peuvent être modifiées par les produits d'hydratation formés. Selon la teneur en C3A du ciment et la quantité d'ions sulfate disponibles, des hydrates, dont la morphologie détériore la plasticité de la suspension, peuvent apparaître. Ces composés sont le gypse secondaire, le monosulfoaluminate, les phases C-A-H et l'ettringite de repos.

Les super-plastifiants sont utilisés pour améliorer les propriétés rhéologiques des systèmes cimentaires. Ces polymères anioniques s'adsorbent à la surface des grains de ciment et engendrent une dispersion des particules soit par une répulsion électrostatique pour les polysulfonates soit par un encombrement stérique pour les polycarboxylates. Une amélioration de la fluidité est ainsi obtenue par la défloculation des grains de ciment et la libération de l'eau retenue dans les flocculats. Une diminution consécutive du seuil d'écoulement est alors observée.

CHAPITRE III
RHEOLOGIE DE LA PATE
CIMENTAIRE

III. CHAPITRE III. Rhéologie de la pâte cimentaire

La rhéologie est une science bien établie qui est appliquée dans différents domaines, par exemple, industrie alimentaire, industrie du papier et construction, la rhéologie est considérée comme une méthode pour le contrôle de la qualité des produits sur une base journalière et comme un outil dans la recherche fondamentale.

III.1. Définition de la rhéologie

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps. Les procédés de préparation de produits (solutions, pâtes, etc....) ou de formage de pièces (en métallurgie, en plasturgie, etc..) nécessitent inmanquablement l'écoulement de la matière, il est donc nécessaire de connaître le comportement de cette matière pour déterminer les forces à mettre en jeu. [14]

La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études :

a. Rhéologie expérimentale

Détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation)

b. Rhéologie structurale

Explication des comportements à partir de la structure du matériau

c. Rhéologie théorique

Fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique.

Autrement cette étude comprend :

- l'élasticité.
- la plasticité.
- la viscosité.

III.2. Paramètres rhéologiques des suspensions

III.2.1. Élasticité

Quand on applique une force à une matière, cette dernière subira une déformation. Quand on supprime la force, si la matière retourne à son état initial, nous sommes en présence d'une matière élastique. Si cette matière est un fluide, n'importe quel système de forces va engendrer

un écoulement. Quand on supprime cette force, le fluide ne revient pas à son état initial. Le fluide n'est donc pas élastique.

III.2.2. Plasticité

Un fluide auquel on doit appliquer une force supérieure au seuil de cisaillement (seuil de rigidité, seuil de plasticité) pour qu'il puisse s'écouler, est un fluide plastique. Si la contrainte appliquée est inférieure au seuil de cisaillement, ce fluide a un comportement élastique. Le seuil de cisaillement est donc la contrainte au-dessous de laquelle le fluide a un comportement élastique.

III.2.3. Viscosité

La viscosité est la mesure des frictions internes d'un fluide lors de son écoulement. Pour déplacer une couche d'un fluide par rapport à l'autre on doit appliquer une certaine force. Cette force augmente avec la viscosité du fluide.

III.2.4. Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est la contrainte minimale à atteindre pour que le fluide s'écoule. Il correspond à l'énergie minimale qu'on doit apporter pour briser le potentiel d'interaction physico-chimique des particules.

III.2.5. Viscosité plastique

L'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation est correctement décrite par le modèle de Bingham.

III.2.6. La thixotropie

Si la viscosité d'un fluide diminue avec la durée d'application de la contrainte de cisaillement, ce liquide est thixotropique.

Si la viscosité d'un fluide augmente avec la durée d'application de la contrainte de cisaillement, ce liquide est rhéopectique.

III.3. Comportements du fluide

Le comportement le plus simple est le comportement Newtonien qui a une relation linéaire entre contrainte du cisaillement et taux du cisaillement. La contrainte du cisaillement de ce fluide (par exemple eau).

L'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation est correctement décrite par le modèle de Bingham.

Seulement un seul point est exigé pour déterminer ce comportement du fluide

Cependant, la plupart des fluides sont des fluides non-newtoniens qui signifient de plus qu'un point est exigé de décrire leur comportement d'écoulement. La pâte du ciment, mortier et béton peuvent être décrits comme des suspensions viscoplastiques. Cela veut dire qu'au-dessous d'une valeur de la contrainte critique. (Le seuil de cisaillement) la matière se comporte comme un solide mais s'écoule comme un liquide visqueux quand cette contrainte est dépassée

($\tau > \tau_0$). Le type le plus simple de ce comportement est le comportement linéaire de fluide Bingham.

La viscosité plastique est l'inclinaison de la ligne linéaire d'un fluide Bingham.

Dans beaucoup de cas le comportement de l'écoulement de pâte du ciment, mortier ou béton peut être exprimé par cette formule. Le seuil de cisaillement est une mesure de la force nécessaire à commencer un mouvement du béton (résistance d'écoulement), alors que la viscosité plastique est une mesure de la résistance du béton contre une vitesse augmentée de mouvement.

Cependant, les fluides n'exposent pas toujours de comportement de l'écoulement linéaire. Dans les tels cas les modèles non-linéaires comme le modèle de Herschel-Buckley peuvent être appliqués.

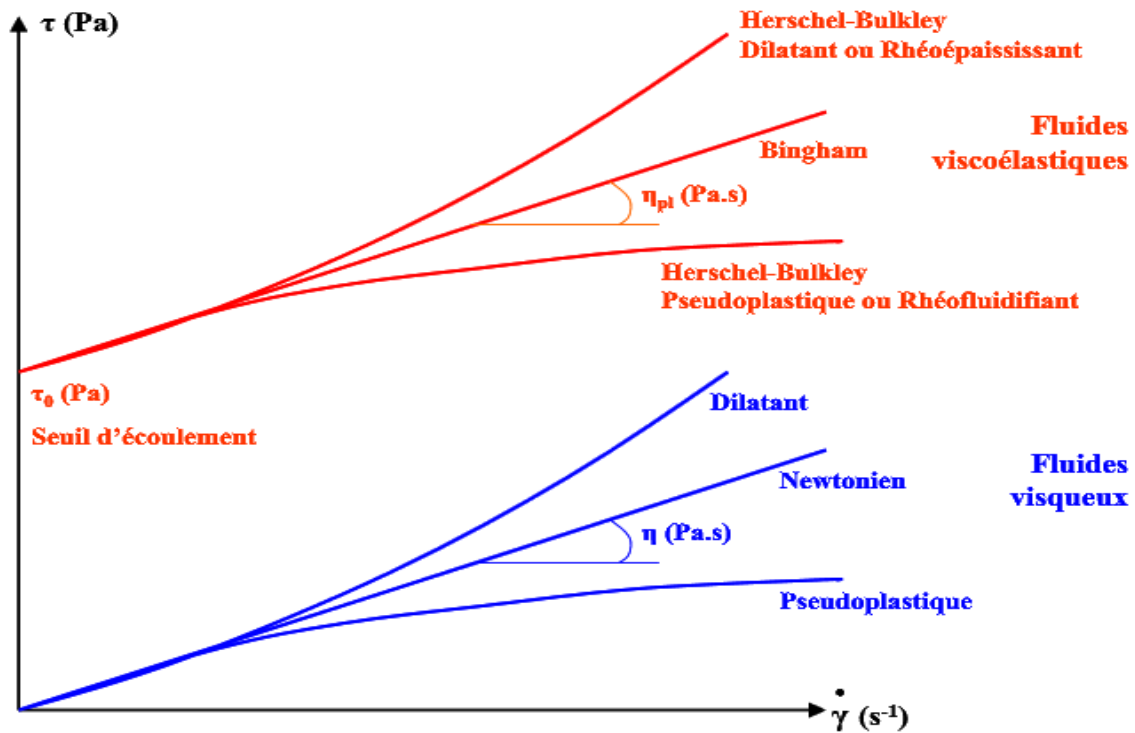


Figure 8. Différents types d'écoulement de la matière.

III.4. Importance des forces de cisaillement

Les forces électrostatiques jouent un grand rôle dans les interactions entre les particules de ciment, mais sont très difficiles à décrire qualitativement.

Pour obtenir une maniabilité convenable du béton, un grand excès d'eau doit être ajouté, souvent deux à trois fois la quantité requise pour l'hydratation du ciment. Cependant une telle dilution ne détruit pas les amas de grains mais les sépare tout simplement. A ce moment-là, certaines forces inter-particulaires sont rompues et les agglomérats restants peuvent bouger indépendamment les uns des autres. [14]

Les forces de cisaillement prédominent devant les autres forces dans le cas du ciment car les particules sont de grandes tailles. Plus précisément, en considérant le nombre de Peclet (Pe) comme le rapport entre la contrainte de cisaillement $\sigma\tau$ et la contrainte thermique « kBT/a^3 »

III.5. Rhéologie de la pâte de ciment

Il est très difficile de définir l'écoulement d'une pâte de ciment. Nous pouvons dire que la pâte de ciment peut avoir un comportement pseudo-plastique, avec ou sans seuil de rigidité. La pâte de ciment peut être aussi thixotropique. [14]

Les facteurs chimiques sont très importants dans la rhéologie du ciment de même que le temps et la température.

III.6. Influence de l'évolution chimique

Ce comportement de la pâte de ciment peut être expliqué par l'évolution chimique de la pâte, ce dernier est très rapide au cours du malaxage car dans les quelques minutes qui suivent l'étape de la dissolution, la surface des grains se recouvre d'hydrates tels que le C-S-H et l'ettringite.

Les réactions sont ensuite très lentes pendant la période "dormante". A ce moment l'interface eau-ciment est constituée d'une couche d'hydrates dont l'épaisseur augmente dans le temps.

L'hydratation se poursuit par l'établissement des liaisons chimiques de plus en plus nombreuses entre les grains. Après la période "dormante", l'ensemble des réactions de dissolution et de formation d'hydrates s'accélère.

CHAPITRE V
ÉTUDE EXPERIMENTALE

V. Étude expérimentale

Dans cette partie, nous exposons les différentes étapes que nous avons suivies pour réaliser ce travail pour objectif d'étudier la compatibilité ciment super plastifiant sur une pâte cimentaire dotée par différents superplastifiants, il s'agit de quinze formulations synthétisées par une entreprise dans le domaine des matériaux pour génie civil, dans un cadre de coopération avec l'unité de recherche UR-MPE de l'université de Boumerdès.

V.1. Matériaux d'étude

V.1.1. Ciment

Le ciment utilisé porte le nom commercial MATINE est prélevé de la cimenterie de M'sila de type CEM II /B 42.5 N (NA 442)

Tableau 4. Analyses chimiques

Paramètre	Valeur
Pert au feu	7.5 – 12
Résidus insoluble	0.7 – 2
Teneur en sulfates SO_3	2 - 2.7
Teneur en oxyde de magnésium	1 - 2.2
Teneur en chlorures	0.01 - 0.05
Teneur équivalent en alcalis	0.3 - 0.75

Tableau 5. Composition minéralogique de ciment (CLINKER).

Minéraux	Pourcentage
C_3S	58 – 64
C_2S	12 – 18
C_3A	6 – 8
C_4AF	10 – 12

Tableau 6. Caractéristiques physiques du ciment MATINE

Caractéristique	Valeurs	Unité
S.S. Blaine (NA 231)	4150 – 5250	Cm^2/g
Consistance normale	25 – 28.5	%
Début de prise (NA 230)	140 – 195	Min
Fin de prise (NA 230)	195 – 290	Min
Retrait à 28 jours	<1000	$\mu m/m$
Expansion	0.3 – 2.5	Mm

Tableau 7. Résistance à la compression

Age	2 jours	28 jours
Résistance à la compression	$\geq 10\text{Mpa}$	$\geq 42.5\text{Mpa}$

V.1.2. Superplastifiants

Les différents supers plastifiants (14) que nous avons utilisés sont fournis par une société privée à base de poly carboxylate, ces superplastifiants sont ajoutés dans l'eau de gâchage avec différentes pourcentages

on a utilisé l'eau potable du robinet sans passer par l'analyse chimique et on a admis qu'elle était propre à la consommation et qu'elle renferme toutes les prescriptions.



Figure 9. Les 14 supersplastifiants à base de polycarboxylates.



Figure 10.Préparation de ciment.

V.2. Point de saturation

Pour un meilleur comportement rhéologique, il faut déterminer le pourcentage optimal des adjuvants qui introduit dans le coulis de ciment.

Pour caractériser les propriétés rhéologiques de pâtes considérées, nous avons utilisé un viscosimètre rotatif VT550 d'un système géométrie SV-DIN à vitesse imposée, afin de minimiser l'influence de la sédimentation sur les mesures rhéologiques, nous avons choisi de travailler avec une géométrie de cylindres coaxiaux. Par ailleurs, l'intérêt de cette géométrie est que le cisaillement est appliqué de manière uniforme sur la pâte. Les caractéristiques de géométrie sont : le diamètre du cylindre intérieur est de 18.4 mm, celui du cylindre extérieur est de 23.6 mm, de longueur 60 mm et de volume 55 cm³. Cela donne un gape de 2.6 mm, qui est ainsi beaucoup plus grand que de la taille des plus gros grains constituant la pâte, ce qui favorise une bonne mesure, le matériau placé dans un cylindre extérieur creux fixé et le cisaille est imposée par rotation du cylindre pleine à l'intérieur. Le résultat de cisaillement d'une suspension cimentaire est déterminé la viscosité et la contrainte seuil, le ciment été testés pour un rapport :E/C=0,5.



Figure 11. Viscosimètre VT550

On a varié le dosage des adjuvants jusqu'à le coulis déveine newtonienne, c'est une viscosité plastique constant en fonction du gradient de vitesse, ce dosage n'influencé pas sur la propriété rhéologique du coulis de ciment, le point de saturation en adjuvant est toujours pour un rapport E/C=0.5

V.2.1. Mode opératoire

- Peser 100g du ciment ;
- Peser les différentes quantités de l'adjuvant étudié (de 1%, 1,5%, 2 %) ;
- Mesurer 50 ml de l'eau (rapport E/C=0.5) ;
- Mélanger le ciment et l'eau et l'adjuvant pendant au moins 5 minutes

(Cisaillement) ;

- Mettre une certaine quantité de ce mélange dans le cylindre de rhéomètre ;
- Cherche le point de saturation à partir de rhéomètre.

Le tableau suivant présente la quantité et le dosage nécessaire des matériaux pour l'étude :

Tableau 8. Quantité et le dosage nécessaire

Ciment (g)	Eau (g)	Super plastifiant (g)	E/C
100	50	1%	0.5
100	50	1.5%	0.5
100	50	2%	0.5



Figure 12. Mode opératoire de mélange ciment super-plastifiants.



Figure 13. Présente l'appareille de viscosimètre.

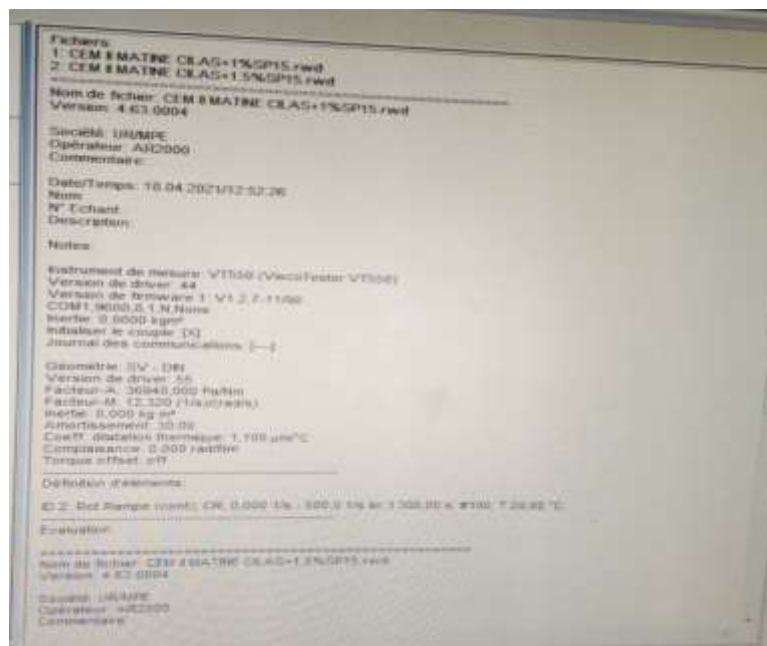
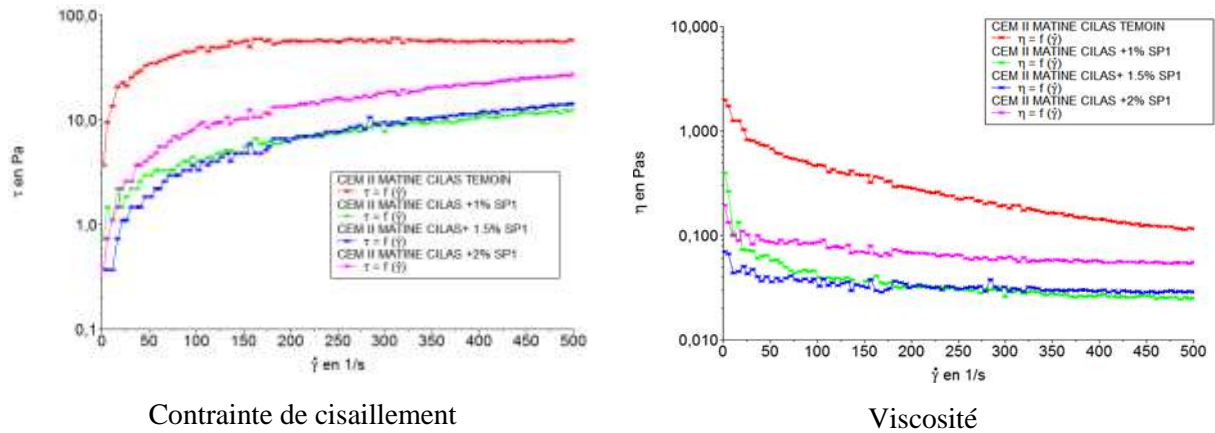


Figure 14. Notice technique de l'appareille

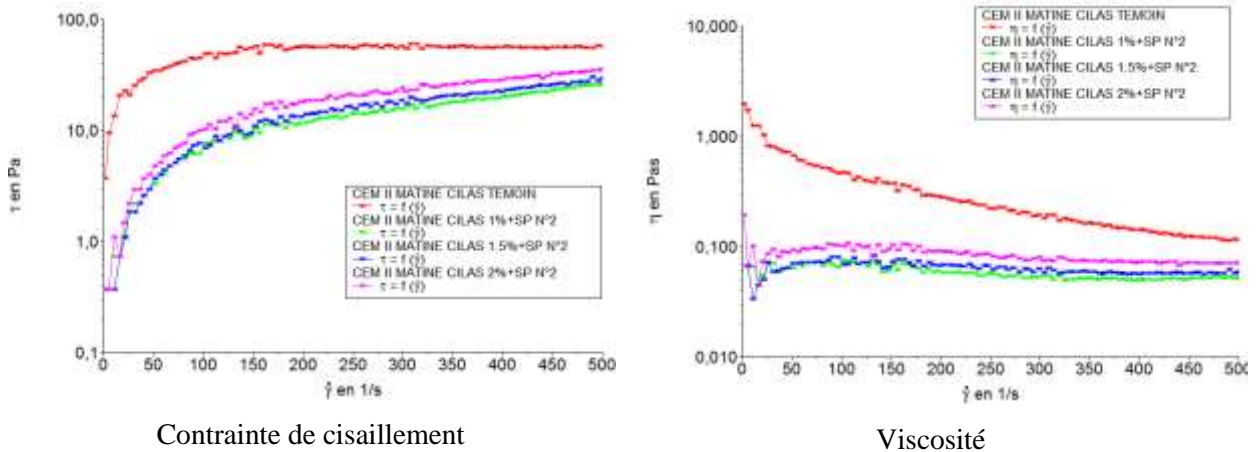
V.2.2. Résultats et discussion

Les rhéogrammes de viscosité et contraintes sont présentés dans les figures ci-après

Superplastifiant 1, Point de saturation : 1% ; Stable jusqu'à 1,5%



Superplastifiant 2, Point de saturation : 1% ; Stable jusqu'à 2%



Superplastifiant 3, Point de saturation : 1% ; Stable jusqu'à 1,5%

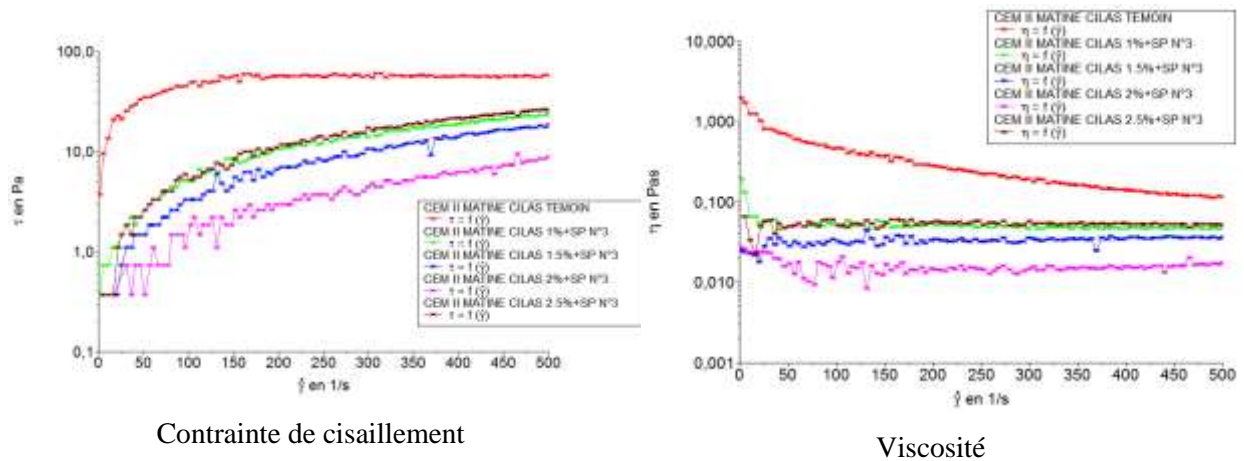
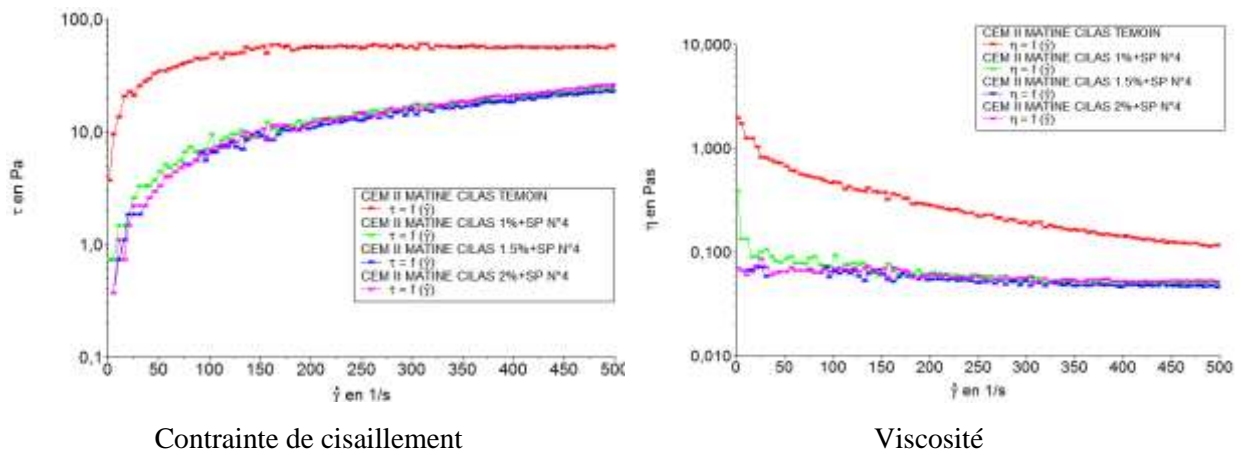
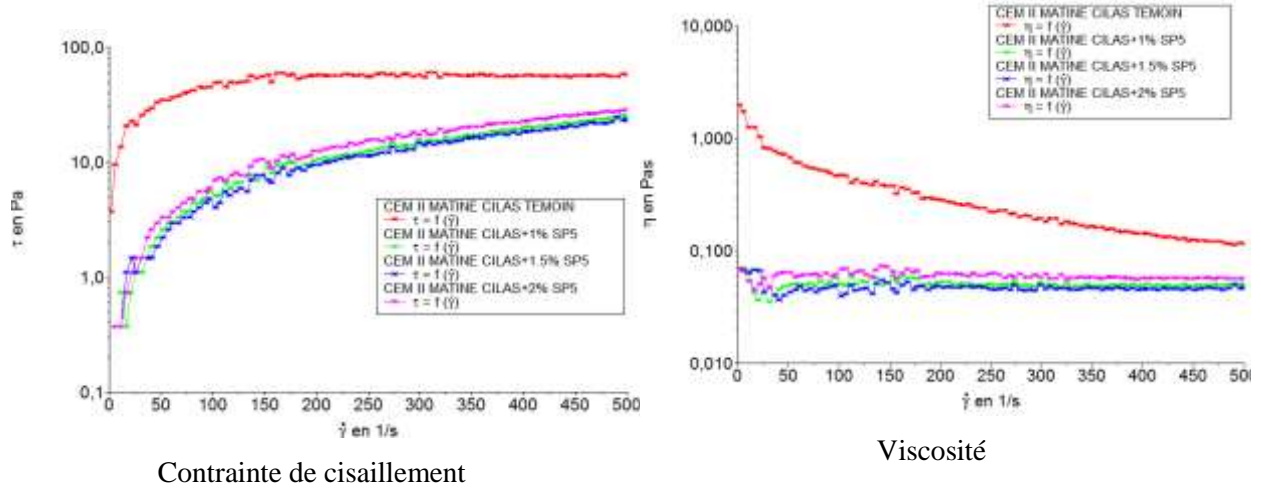


Figure 15. Rhéogramme de viscosité et contrainte de cisaillement des superplastifiants SP 1, SP2, SP3

Superplastifiant4, Point de saturation :1,5% ;Stable jusqu'à 2%



Superplastifiant5, Point de saturation :1% ; Stable jusqu'à 2%



Superplastifiant6, Point de saturation :1% ; Stable jusqu'à 2%

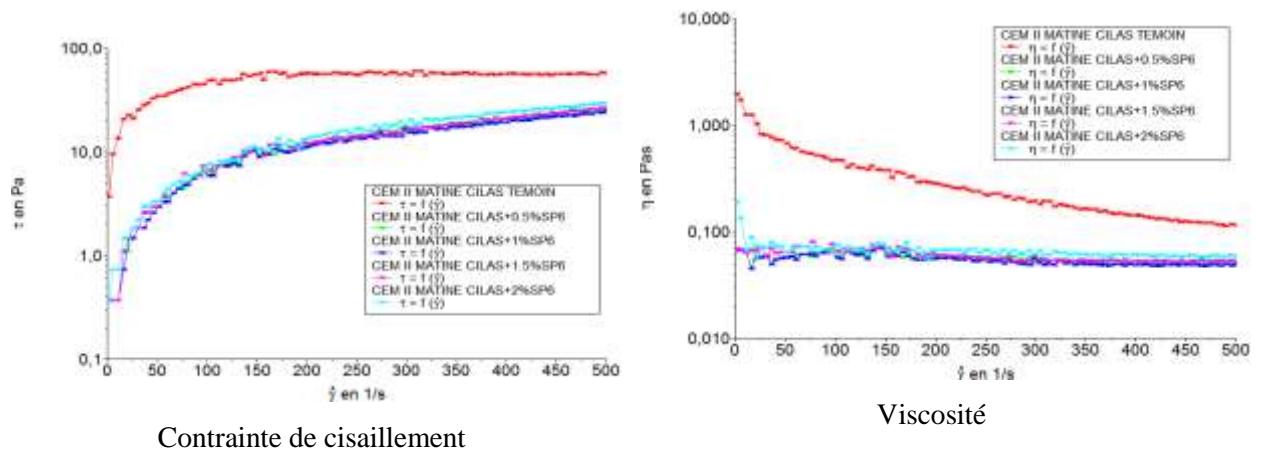
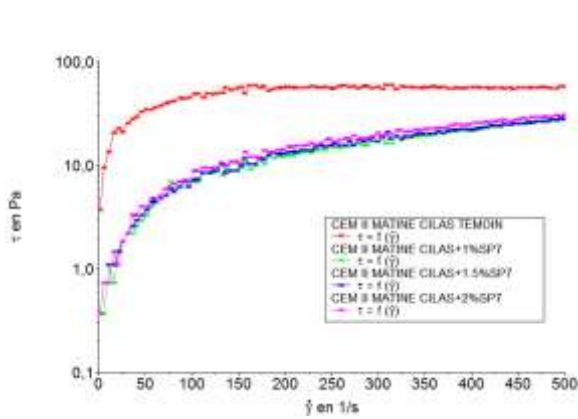
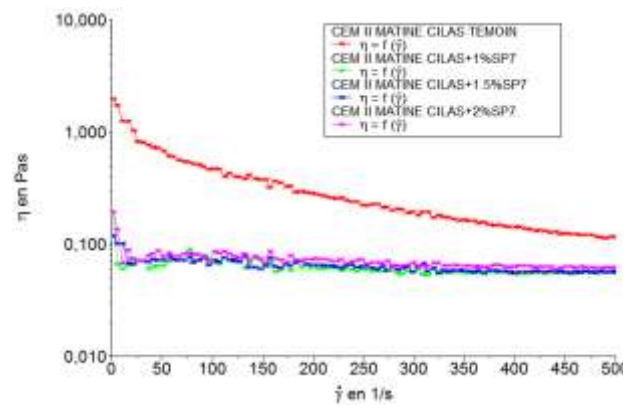


Figure 16. Rhéogramme de viscosité et contrainte de cisaillement des superplastifiant SP 4, SP4, SP6

Superplastifiant7, Point de saturation :1% ; Stable jusqu'à 2%

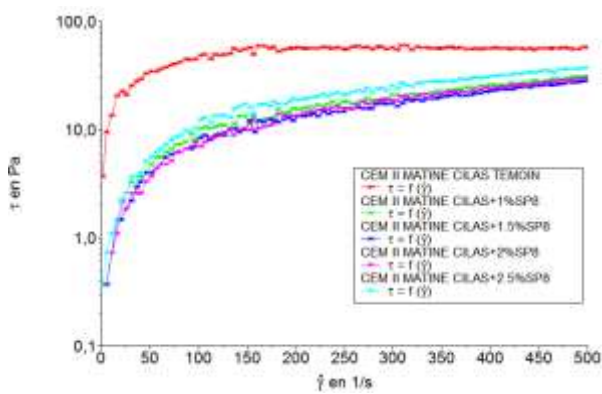


Contrainte de cisaillement

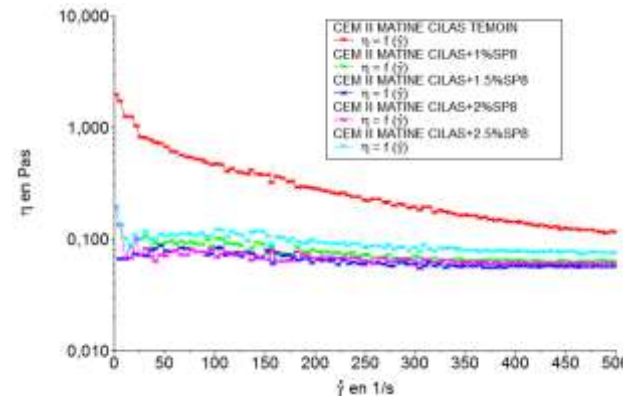


Viscosité

Superplastifiant8, Point de saturation :1,5% ; Stable jusqu'à 2%

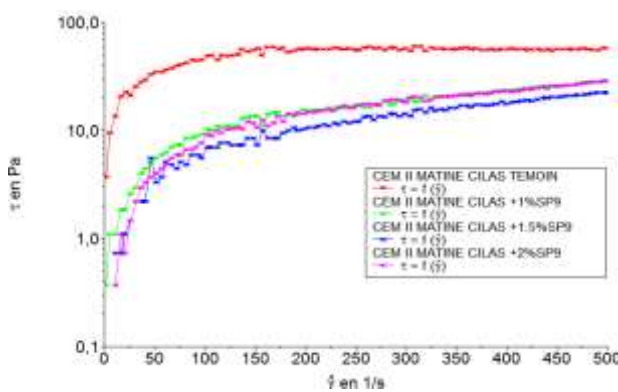


Contrainte de cisaillement

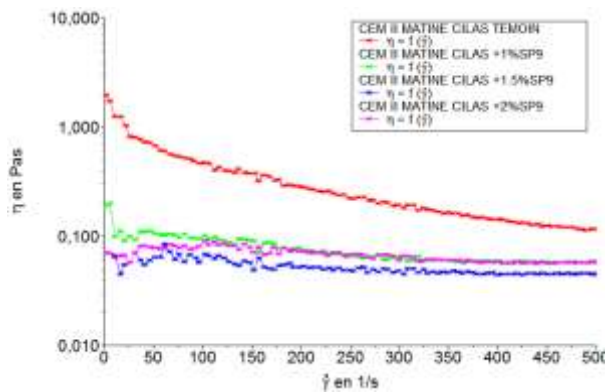


Viscosité

Superplastifiant9, Point de saturation :1,5% ;Stable jusqu'à 1.5%



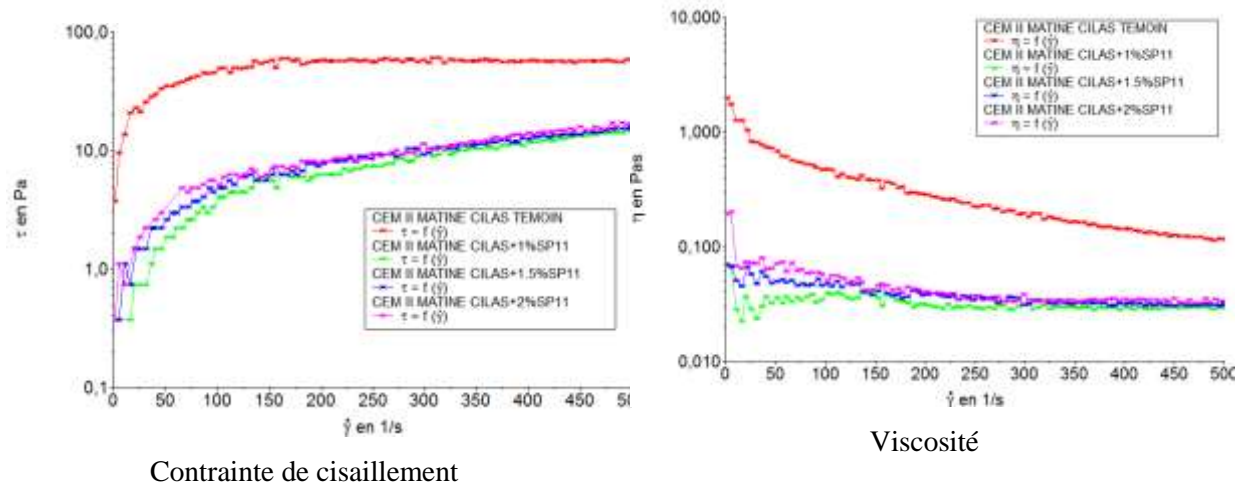
Contrainte de cisaillement



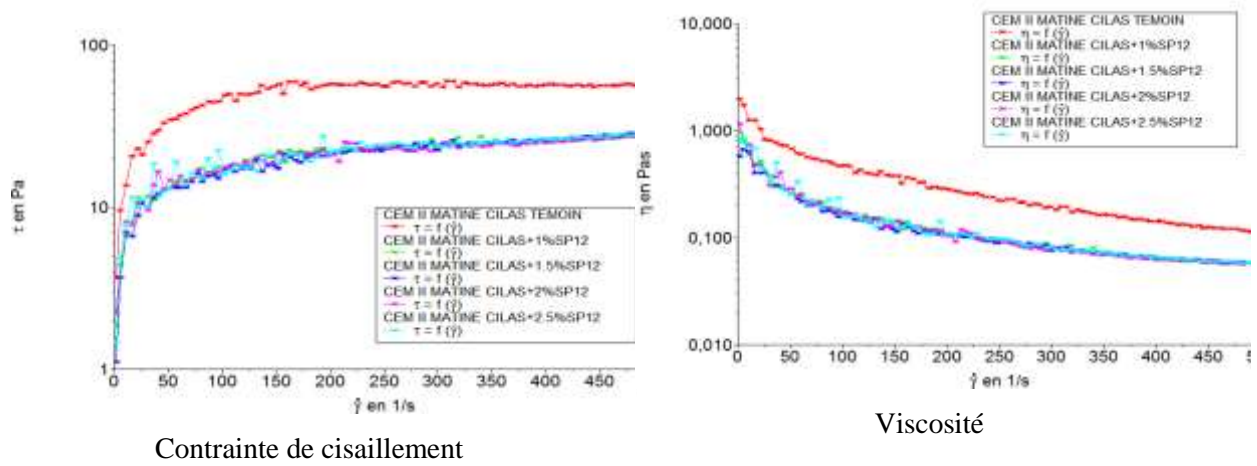
Viscosité

Figure 17. Rhéogramme de viscosité et contrainte de cisaillement des superplastifiant SP 7, SP8, SP9

Superplastifiant 11, Point de saturation :1% ;Stable jusqu'à 2%



Superplastifiant 12, Point de saturation :1%, Dosage max 2,5%



Superplastifiant 13, Point de saturation :2%, Dosage max 2,5%

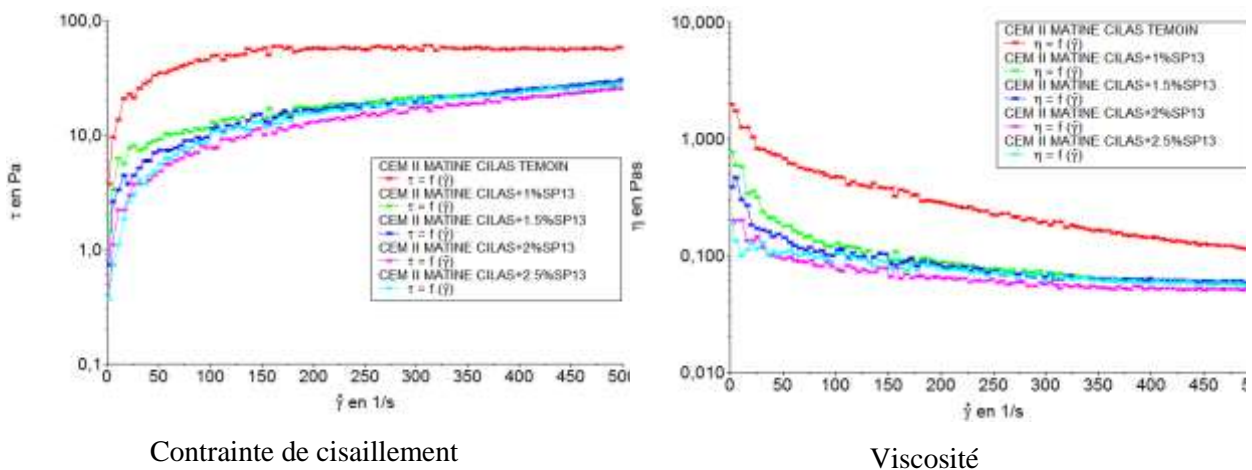
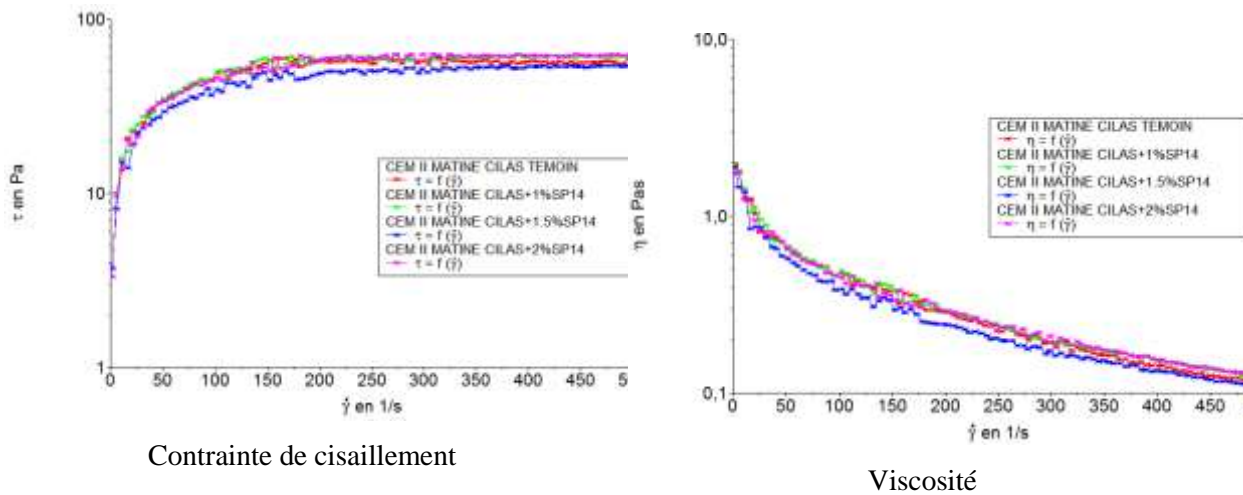


Figure 18. Rhéogramme de viscosité et contrainte de cisaillement des superplastifiant SP 11, SP12, SP13

Superplastifiant 14, Point de saturation :1,5%, Dosage max 2,5%



Superplastifiant 15, Point de saturation :1%, Dosage max 2,5%

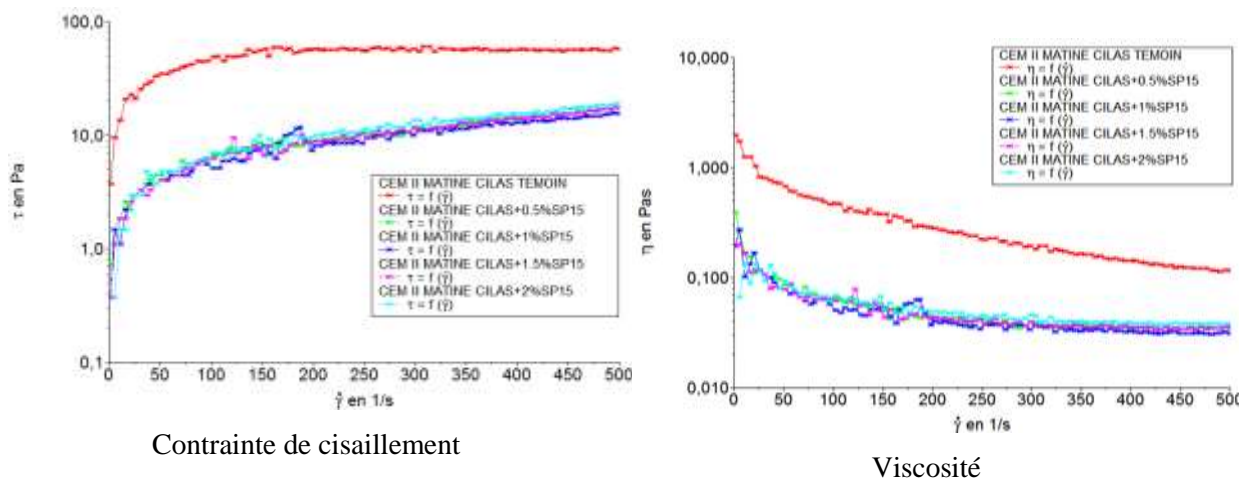


Figure 19. Rhéogramme de viscosité et contrainte de cisaillement des superplastifiant SP 14 et SP 15

Discussion

Les supersplastifiants sont ajoutés aux pâtes de ciment pour augmenter leur maniabilité à $E/C=0,5$ constant ou pour diminuer leur E/C à fluidité constante. En augmentant le dosage en super plastifiant, on atteint un point de saturation qui représente la quantité de superplastifiant au-delà de laquelle il n'y a plus d'effet mesurable additionne sur la fluidité de la pâte de ciment.

Les figures 7 représentent l'action du superplastifiant sur le comportement rhéologique de la pâte de ciment, dans lesquelles nous remarquons que :

- Le super plastifiant SP3 est plus efficace, l'efficacité est présentée en ordre décroissante (de 1 à 14) dans le tableau ci-après ;
- Le superplastifiant SP14 n'a aucun effet sur la rhéologie de la pâte cimentaire ;
- Les super plastifiants SP 4, 6, 7, 12 et SP 15 sont les plus stable et donne une fourchette de dosage large ;
- Les super plastifiants SP 1 et SP 3 sont les moins stables.

Le tableau suivant représente les résultats obtenus d'étude

Tableau 9. Analyse des résultats des essais sur viscosimètre

Paramètre	Vitesse de rotation (S^{-1})				Activité (Ordre Décroissant)	Stabilité A : Très Stable B : Stable C : Stabilité médiocre	
	300		500				
Paramètre	Contrainte (Pa)	Viscosité (Pa.S)	Contrainte (Pa)	Viscosité (Pa.S)			
Témoin	55,040604	0,180698	57,9958	0,115978	14	/	
SP1	1%	9,235001	0,03046	12,5596	0,025116	2	C
	1,5%	8,8656	0,029106	14,4066	0,02881		
	2%	18,839399	0,061927	27,705	0,055404		
SP2	1%	16,622999	0,054642	26,2274	0,052449	10	B
	1,5%	17,731199	0,058211	29,552	0,059097		
	2%	22,5334	0,074323	35,831799	0,071656		
SP3	1%	16,253601	0,053361	24,011	0,048017	1	C
	1,5%	10,7126	0,035169	18,470001	0,036936		
	2%	4,8022	0,015766	8,8656	0,017729		
	2,5%	16,253601	0,053292	26,2274	0,052449		
SP4	1%	15,884199	0,05208	25,1192	0,050233	7	A
	1,5%	14,4066	0,047297	23,272202	0,046539		
	2%	17,731199	0,058211	25,858	0,05171		
SP5	1%	14,776	0,04851	25,1192	0,050233	6	B
	1,5%	14,037201	0,046084	23,272202	0,046539		
	2%	18,839399	0,061927	28,8132	0,05762		
SP6	0.5 %	16,992401	0,056047	25,858	0,05171	8	A
	1%	15,5148	0,051042	24,7498	0,049494		
	1,5%	16,622999	0,054573	26,5968	0,053188		
	2%	20,316999	0,066701	29,9214	0,059836		
SP7	1%	18,100599	0,059424	28,074402	0,056142	11	A

	1,5%	19,208799	0,063142	28,074402	0,056142		
	2 %	19,208799	0,063357	31,0296	0,062052		
SP8	1 %	21,055799	0,069126	31,399	0,062791	13	B
	1,5 %	16,622999	0,054642	28,8132	0,05762		
	2 %	18,470001	0,060637	29,9214	0,059836		
	2,5 %	24,011	0,078828	38,048203	0,076088		
SP9	1 %	20,316999	0,066701	29,1826	0,058359	5	B
	1,5 %	13,6678	0,044871	22,5334	0,045062		
	2 %	19,947599	0,065794	28,8132	0,05762		
SP11	1 %	9,6044	0,031531	14,776	0,029549	3	B
	1.5 %	9,6044	0,031571	15,884199	0,031765		
	2 %	10,343201	0,033957	16,622999	0,033242		
SP12	1 %	24,380402	0,080209	28,074402	0,056142	12	A
	1,5 %	24,7498	0,081148	29,552	0,059097		
	2 %	24,380402	0,080141	28,074402	0,056142		
	2,5 %	23,6416	0,077779	28,8132	0,05762		
SP 13	1 %	21,4252	0,070668	28,074402	0,056142	9	B
	1,5 %	21,055799	0,069126	30,660198	0,061313		
	2 %	17,731199	0,058334	25,1192	0,050233		
	2,5 %	20,686401	0,067913	28,8132	0,05762		
SP14	1 %	57,6264	0,189187	60,2122	0,120411	14	B
	1,5 %	49,499599	0,16285	53,563	0,107114		
	2 %	58,3652	0,191613	62,798	0,125582		
SP15	0,5	11,8208	0,038808	17,361799	0,03472	4	A
	1%	11,082001	0,036505	15,5148	0,031026		
	1,5 %	11,082001	0,036335	17,361799	0,03472		
	2 %	13,6678	0,044871	19,208799	0,038413		

V.3. Essai d'étalement au mini cône

L'essai au mini cône d'affaissement est utilisé pour caractérisation du coulis. Il s'agit de mesurer le diamètre d'un certain de coulis dans le mini cône sur une plaque. Des études ont montré qu'il existe une corrélation entre l'affaissement du coulis ou du béton et le seuil de cisaillement. Le mini cône d'affaissement a un diamètre de 07 cm, et une hauteur de 57 mm.

V.3.1. Mode opératoire

- Peser 200 g de ciment ;
- Peser la quantité appropriée d'eau dans un bêcher de 250 ml (en général cet essai est effectué avec un rapport eau/ciment 0,5 ; 0,3) ;
- Peser la quantité de superplastifiant (0.5% ,1%, 1.5% ,2%) et l'ajouter à la quantité d'eau précédente ;
- Mélanger la pâte de ciment pendant 5 minutes ;après le démarrage du chronomètre ;
- Ajuster la température du coulis à la température désirée (en général, cette température est de l'ordre de 20°C) ;
- Placer la plaque sur la table, et vérifier qu'elle est bien au niveau puis placer le cône au centre de cette plaque, remplir le mini cône avec cette pate ;
- Donner dix coups sur la partie supérieure du mini cône avant de le soulever rapidement de telle sorte que la pâte s'étale.
- le coulis sort en formant une galette qui s'élargit sous l'effet de la gravité, la maniabilité de coulis consiste en mesure la valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de coulis.



Figure 20. Détermination d'étalement : a. remplissage du mini cône, b. exemple d'étalement, d. cas de coulé ferme

V.3.2. Résultats et discussions

En observations visuelles, les coulées adjuvantes dès qu'elles sont étalées sur la galette, on observe une remontée d'un liquide sur une partie qui se précipite, cela signifie qu'il y a naissance de certains phénomènes d'interaction dus à l'existence de superplastifiants, conduisant à la floculation.

Ces remarques nous obligent de prendre en considération le temps de maintien c'est-à-dire le temps nécessaire ou l'affaissement reste garantie par le superplastifiant, ces types de vérification sont très souvent réalisés sur le béton à l'aide de cône d'Abrams.

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau ci-après

Tableau 10. Résultats d'étalement pour différentes superplastifiants

E/C	D*	Code de superplastifiant (SP)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	
0,3	0	F*														
	0,5	7	19	8	11	15	20	9	8	7	F	F	F	F	F	
	1	10	23	15	15	19	23	12	11	9	8				11	
	1,5	16	27	24	17	23	26	16	18	13	11	9,5			17	
	2,0	18	29	27	24	27	29	20	24	16	15	11	9	8	19	
0,5	0	15														
	0,5	16	28	23	24	30	29	27	19	24	23	18	16	16	23	
	1	18	27	28	27	30	29	28	24	27	28	15	18	18	25	
	1,5	20	31	30	27	29	29	28	27	25	27	17	21	20	25	
	2	24	26	28	28	32	29	28	27	28	26	19	19	19	28	

D* : Dosage de superplastifiant

F* : ferme

La représentation graphique des résultats d'étalement nous à permet de discuter l'effet des différentes formulations sur l'augmentation de l'ouvrabilité pour un rapport E/C fixé, sur le maintien de l'ouvrabilité pour un rapport E/C diminué ou sur l'augmentation de l'étalement pour un rapport E/C diminué.

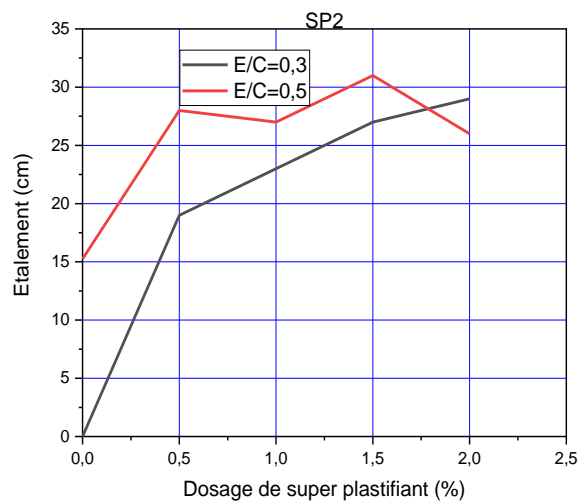
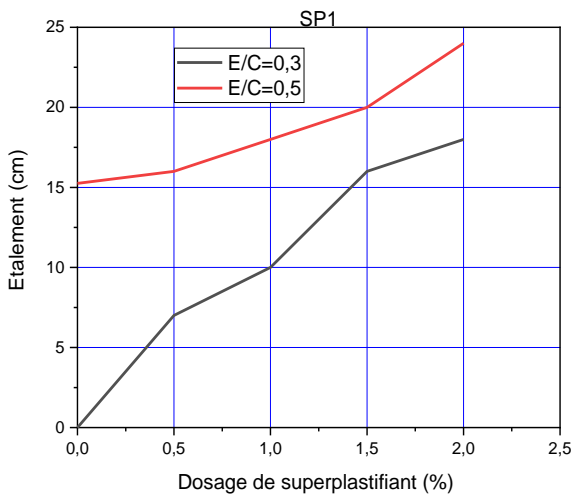


Figure 21. Résultats d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant pour SP1 et SP2

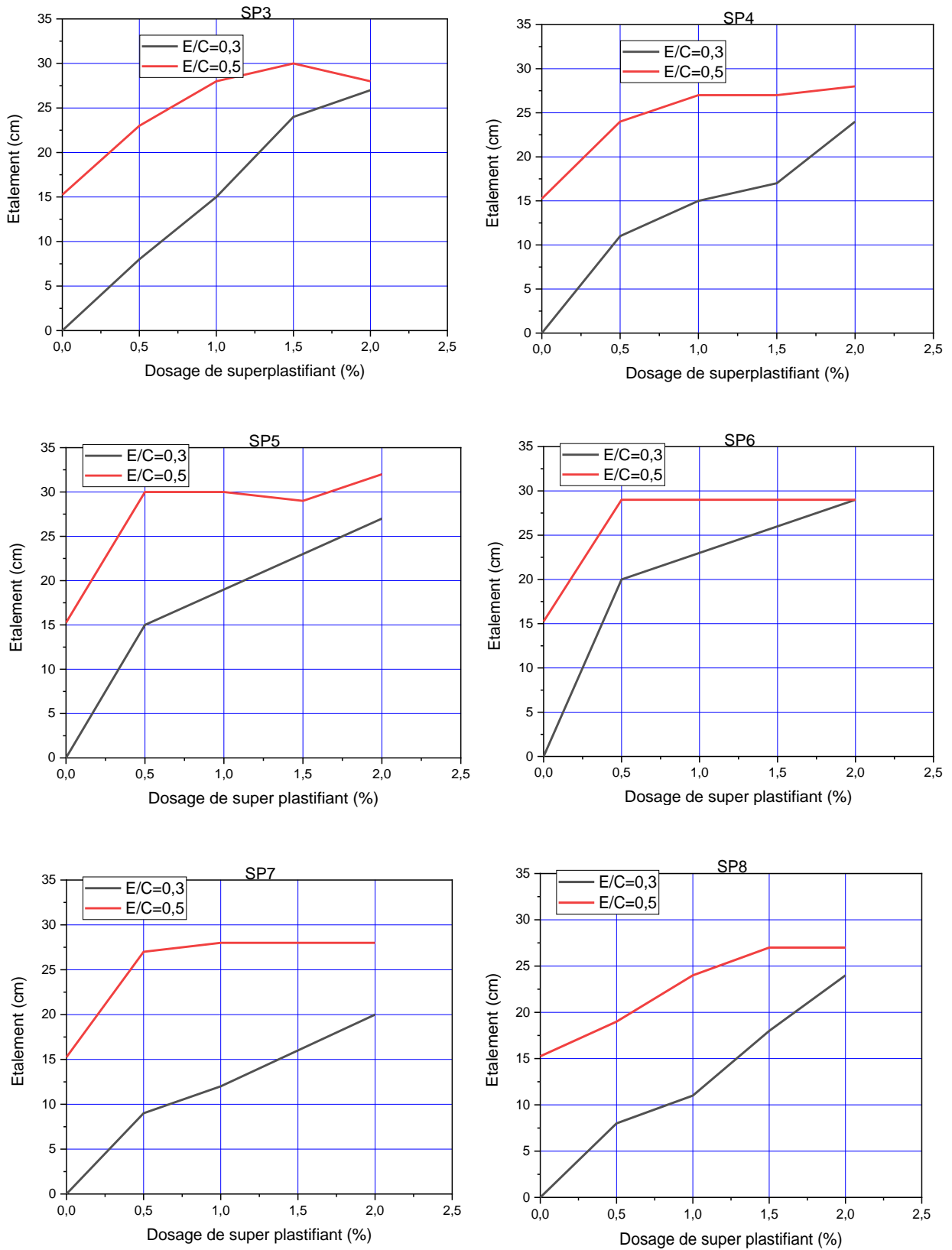


Figure 22. Résultats d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant SP :3, 4, 5, 6, 7 et 8

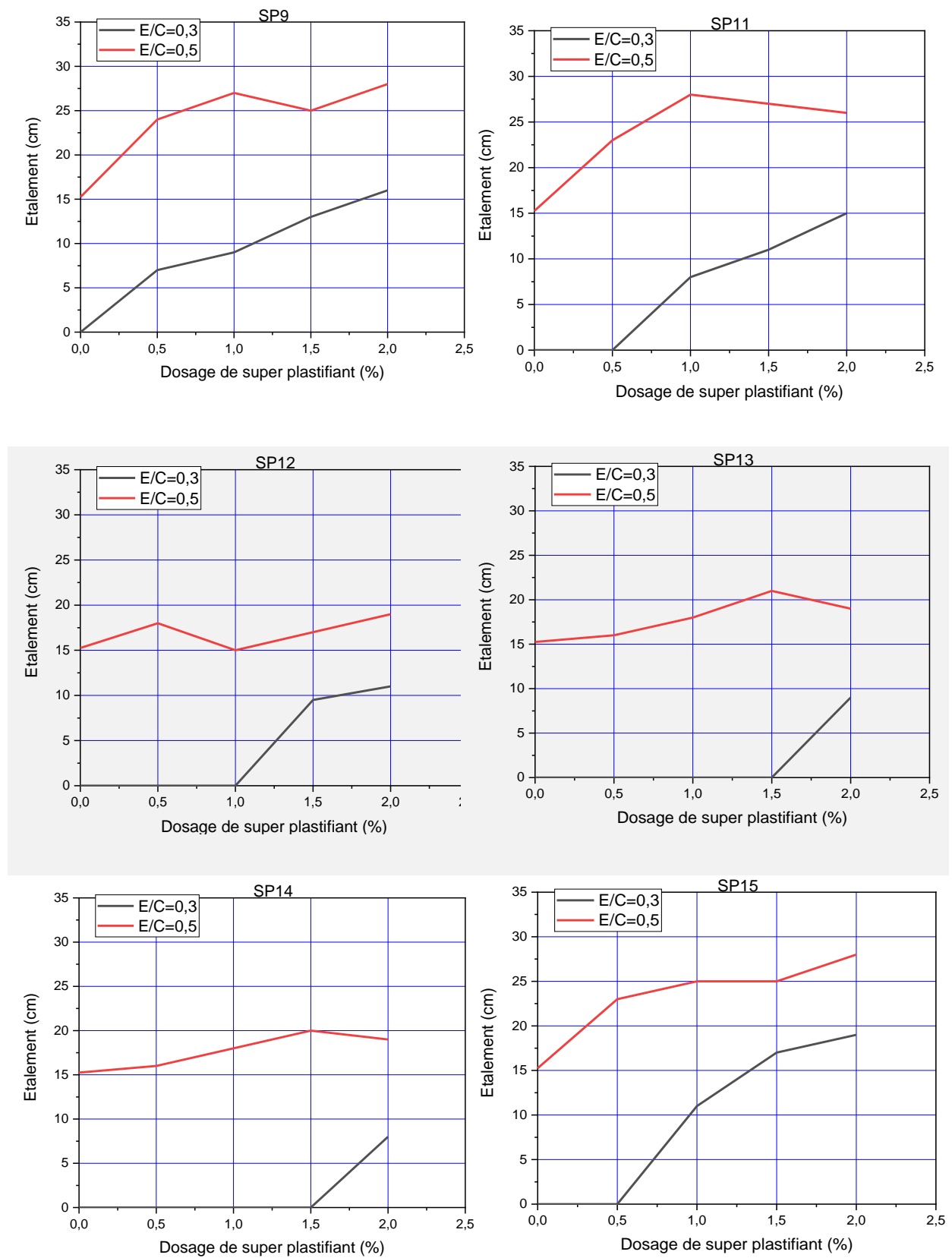


Figure 23. Résultats d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant SP : 9,11,12,13,14 et 15

Le rapport E/C présente une influence capitale sur l'ouvrabilité du ciment. Cette influence change de comportement lorsque la pâte cimentaire adjuvanté par un superplastifiant ou l'ouvrabilité de la pâte cimentaire reste contrôlé par le dosage, type de différents superplastifiants et le rapport E/C

A partir de ces courbes d'évolution de l'étalement, il est possible de déterminer l'efficacité de différentes formulations des superplastifiants en termes de réduction du rapport E/C pour grader le même étalement, le tableau ci-dessous indique les paramètres suivants :

- Dosage de réduction : c'est le dosage nécessaire du superplastifiant correspondant au rapport E/C = 0,3 pour donner l'étalement qui correspond au rapport E/C= 0,5 ;
- Le dosage de fonctionnement c'est-à-dire le dosage nécessaire pour voir l'apparition de l'effet de fluidité.
- Dosage max de fonctionnement : c'est le dosage maximum de l'adjuvant, ou delà de cette valeur, on n'observe aucune amélioration de la fluidité.

Tableau 11. Paramètres d'étalement de différents superplastifiants

Type de superplastifiant	Dosage de fonctionnement	Dosage de réduction	Dosage max de fonctionnement	
			E/C =0,3	E/C = 0,5
SP1	Inférieur à 0,5 %	1,4 %	/	/
SP2		0,8 %	/	1,5 %
SP3		1 %	/	1,5 %
SP4		1 %	/	1 %
SP5		0,5 %	/	0,5 %
SP6		0,3 %	/	0,5 %
SP7		1,3 %	/	0,5%
SP8		1,25 %	/	1,5 %
SP9		1,8 %	/	1 %
SP11	0,5%	2 %	/	1 %
SP12	1%	/	1,5 %	0,5 %
SP13	1,5%	/	/	1,5 %
SP14	1,5%	/	/	1,5 %
SP15	0,5%	1,3 %	/	1 %

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était d'étudier la compatibilité du ciment et des superplastifiants à base de polycarboxylates. Quinze formulations de polycarboxylates sont fournies par une entreprise privée, en collaboration avec l'unité de recherche UR-MPE de l'Université de Boumerdès.

Les résultats obtenus à partir de cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'identification expérimentale des caractéristiques physico-chimique et mécaniques des différents matériaux est obligatoire (ciment et adjuvant) pour limiter notre champ d'investigation autour de :
- L'influence de la nature et type de ciment.
- L'effet des différents super plastifiants sur les propriétés physico-mécaniques de ciment.

L'étude rhéologique nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le comportement rhéologique de la pâte cimentaire suit à la loi de Bingham ;
- L'augmentation de pourcentage de l'adjuvant (jusqu'au point de saturation) fait diminuer la viscosité plastique ;
- La contrainte de cisaillement diminue avec l'augmentation du pourcentage de l'adjuvant jusqu'au point de saturation où le comportement rhéologique de la pâte cimentaire est proche du modèle newtonien, au-delà de point de saturation il n'a pas d'effet sur l'écoulement ;
- Le super plastifiant SP3 est plus efficace ;
- Le superplastifiant SP14 n'a aucun effet sur la rhéologie de la pâte cimentaire ;
- Les super plastifiants SP 4, 6, 7, 12 et SP 15 sont les plus stable et donne une fourchette de dosage large ;
- Les super plastifiants SP 1 et SP 3 sont les moins stables ;
- Par conséquence, le point de saturation varie en fonction de la composition chimique de superplastifiant

L'étude de mini cône à différentes superplastifiants permet de tirer les conclusions suivantes :

- Pour un rapport E/C = 0,3 les superplastifiants SP2, SP3, SP4, SP5, SP6 et SP8 peut donner l'affaissement qui corresponde à un rapport E/C=0,5.
- Pour un Rapport E/C = 0,5 le dosage max de fonctionnement ne dépasse pas 1,5%
- Pour un Rapport E/C = 0,3 le dosage max de fonctionnement ne dépasse pas 2%, excepté la formulation SP12 qui présente un dosage max de 1,5 %
- En termes de diamètre d'étalement, les superplastifiants SP2, SP3, SP5 et SP6 donnent des meilleurs résultats (30cm).

Recommandations

L'étude de mini cône à différentes superplastifiants à tirer l'attention concernant le pouvoir de défloculation, ce qui nécessite d'aller vers l'étude de maintien d'ouvrabilité des pâtes des ciments en fonction du temps.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NF EN 197-1, in Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, edited, AFNOR.
- [2] Jaques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER : Les bétons Bases et données pour leur formulation 2ème tirage 1997. Editions Eyrolles.
- [3] Véronique Baroghel-Bouny. Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994. Français. fftel-00523299f
- [4] F. PERCHE, Adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments. Thèse de Doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.
- [5] Edwige Nicolas. Compatibilités et incompatibilités liants cimentaires/superplastifiants, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010. Français. (NNT : 2010NAN10052). (tel-01748559)
- [6] Martin, L. H. J., Winnefeld, F., Müller, C. J. et al. 2015: Contribution of limestone to the hydration of calcium sulfoaluminate cement, *Cement and Concrete Composites* – 62
- [7] ARTHUR BORDY, Influence des conditions thermo-hydriques de conservation sur l'hydratation de matériaux cimentaires à base d'une fine recyclée. *Matériaux*. Université de Cergy Pontoise, 2016. Français.
- [8] Williams PAUCHET, les adjuvants des bétons, 2019, technique de l'ingénieur, Réf : TBA1036 v2
- [9] ERCE – CTC-Est – GRANITEX. : Journée d'information « ciments-bétons-adjuvants », les adjuvants définitions et opportunités d'utilisation, 2004
- [10] Georges Dreux Jean Festa. : Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8ème édition Eyrolles, ISBN 2-212-10231-3.2002., Nuremberg, Allemagne, 2005.
- [11] YAMADA K., TAKAHASHI T., HANEHARA S., MATSUHISA M. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 2, pp.197-207, 2000.
- [12] FLATT R.J., HOUST Y.F. A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 8, pp. 1169-1176, 2001.
- [13] KREIJGER P.C.: Plasticizers and dispersing admixtures. International congress on admixtures, Londres, Royaume-Uni, 1980.
- [14] SPIRATOS N., PAGÉ M., MAILVAGANAM N.P., MALHOTRA V.M., JOLICOEUR C.: Superplasticizers for Concrete: Fundamentals, Technology, and Practice, Ed. CANMET, Ottawa, Canada, 2003.