

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أمحمد بوقرة بومرداس
Université M'hamed Bougara de Boumerdès



Faculté des Sciences - Département de Chimie

Domaine : Science de la matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie des matériaux

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Présenté et soutenu par

GUELLIL Billal
ACHOURI Souhil

Thème

*Efficacité et compatibilité du couple
ciment/(super)plastifiant*

Le 17 Juillet 2023

Devant les membres de jury :

M.KHEFFACHE Djaffar	Maître de conférences A	FS-UMBB	Président
M.OUALIT Mehena	Maître de conférences A	FS-UMBB	Promoteur
M.IREKTI Amar	Maître de conférences A	FS-UMBB	Examinateur

Remerciements

Louange à Dieu Tout-Puissant, qui nous a aidé et nous a donné la force et la patience pour accomplir ce travail.

Nos premiers remerciements s'adressent naturellement à notre promoteur Monsieur OUALIT Mehena, Maître de Conférences "A" à l'Université M'hamed Bougara de Boumerdès, qui nous a apporté une aide précieuse. Ses conseils et ses encouragements nous ont permis de finaliser ce mémoire, nous espérons qu'il trouve ici l'expression de notre respect profond et de notre sincère gratitude.

Nous voudrions aussi exprimer notre reconnaissance et notre profond respect à Monsieur KHEFFACHE Djaffar Maître de Conférences "A" à l'Université M'hamed Bougara de Boumerdès, pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Nous désirons encore exprimer notre très vive reconnaissance à Monsieur IREKTI Amar, Maître de Conférences "A" à l'Université M'hamed Bougara de Boumerdès, pour avoir accepté d'examiner le contenu de ce mémoire.

Nous remercions aussi Monsieur ABIB Adel, directeur des ventes, construction souterraine chez le groupe *MBCC*, pour l'acceptation de notre demande d'apprentissage au niveau de l'entreprise BASF, et pour tous ses efforts qu'il a faits pour que nous apprenions bien tout au long de la période d'apprentissage.

Nous remercions également Monsieur ANARSI Hamid, ingénieur de laboratoire génie civil à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, pour l'accueil chaleureux, le soutien et l'assistance qu'il nous a apportés lors de la réalisation des expérimentations de rhéométrie.

Et tous nos remerciements et nos grâces aussi à Monsieur LACHACHI Hicham, ingénieur responsable de laboratoire "Béton et Sol" et Monsieur ABELLA Hakim ingénieur de laboratoire ainsi que tout le personnel de laboratoire *Cosider (métro d'Alger)* pour tous les efforts qu'ils ont déployés pour nous guider pendant la période de stage pratique.

Résumé

Dans un environnement en constante mutation, l'utilisation des adjuvants dans les matériaux cimentaires modernes est devenue essentiel et incontournable. Ils sont considérés comme étant un catalyseur essentiel de l'évolution technologique des bétons, que ce soit au niveau des propriétés à l'état frais, qu'en termes de performances mécaniques à l'état durci.

La présente étude s'intéresse particulièrement à l'étude de l'efficacité et la compatibilité du couple ciment/adjuvant. Un superplastifiant dénommé *MasterGlenium Sky 841* et un plastifiant de nom commercial *MasterPozzolith N 399* ainsi que trois types de ciments commerciaux algériens de compositions chimique et minéralogique différentes (CPA, CPJ et CRS) ont été utilisés. Dans l'optique d'optimiser le choix et le dosage de chaque adjuvant par rapport à chaque type de ciment, le comportement rhéologique des coulis a été suivi par des essais au cône de Marsh ainsi qu'à l'aide d'une étude rhéométrique où des paramètres rhéologiques ont été calculés. L'effet de ces adjuvants sur les propriétés physicomécaniques de bétons ordinaires ont été également évalués. Les résultats ont montré que les adjuvants affectent grandement les propriétés rhéologiques en améliorant la fluidité des coulis de ciments. En revanche, une nette incompatibilité entre les deux adjuvants et le ciment composé CPJ a été constatée avec l'apparition de problèmes de miscibilité et d'homogénéité. Le superplastifiant *MasterGlenium Sky 841* s'est avéré plus efficace avec des plages de dosage à saturations moins importantes et un effet maximum sur la fluidité. En outre, nous avons également déduit que les adjuvants utilisés améliorent les performances mécaniques des bétons.

Mots clés : Adjuvants, ciments, compatibilité, comportement rhéologique, dosage à saturation, propriétés mécaniques.

Abstract

In a constantly changing environment, the use of admixtures in modern cementitious materials has become essential and unavoidable. These products are considered to be an essential catalyst for the technological evolution of concrete, both in terms of fresh and hardened properties. This study is particularly interested in the study of the efficiency and the compatibility of the couple cement/admixture. A superplasticizer called *MasterGlenium Sky 841* and a plasticizer with the trade name *MasterPozzolith N 399* as well as three types of Algerian commercial cements with different chemical and mineralogical compositions (CPA, CPJ and CRS) were used. In order to optimize the choice and dosage of each admixture in relation to each type of cement, the rheological behavior of the pastes was monitored by Marsh cone tests as well as using a rheometric study where rheological parameters were calculated. The effect of these admixtures on the physicomechanical properties of ordinary concretes were also evaluated. The results showed that the admixtures greatly affect the rheological properties by improving the fluidity of cement pastes. On the other hand, a clear incompatibility between the two admixtures and the composed cement CPJ was observed with the appearance of miscibility and homogeneity problems. *MasterGlenium Sky 841* superplasticizer was found to be more effective with lower saturation dosing ranges and maximum effect on flowability. In addition, we have also deduced that the admixtures used improve the mechanical performance of the concretes.

Keywords : Admixtures, cements, compatibility, rheological behavior, saturation dosage, mechanical properties.

ملخص

في بيئة متغيرة باستمرار، أصبح استخدام المواد الإضافية في المواد الإسمنتية الحديثة أمرًا ضروريًا ولا مفر منه. تعتبر هذه المنتجات حافزًا أساسيًا للتطور التكنولوجي للخرسانة، سواء من حيث الخصائص الطازجة أو الصلبة. تهتم هذه الدراسة بشكل خاص بدراسة كفاءة وتوافق الزوجين (الإسمنت / الملدن). تم استخدام مادة ملدنة فائقة تسمى MasterGlenium Sky 841 وملدنات بالاسم التجاري MasterPozzolith N 399 بالإضافة إلى ثلاثة أنواع من الإسمنت التجاري الجزائري بتركيبات كيميائية ومعدنية مختلفة CPA وCPJ وCRS من أجل تحسين الاختيار والجرعة لكل مزيج فيما يتعلق بكل نوع من أنواع الإسمنت، تمت مراقبة السلوك الانسيابي للمعاجين عن طريق اختبارات cône de marche وكذلك باستخدام دراسة قياس الانسيابية حيث تم حساب المعلمات الانسيابية. كما تم تقييم تأثير هذه المواد المضافة على الخصائص الفيزيائية الميكانيكية للخرسانة العادية. أظهرت النتائج أن المواد المضافة تؤثر بشكل كبير على الخواص الريولوجية من خلال تحسين سيولة معاجين الإسمنت. من ناحية أخرى، لوحظ عدم توافق واضح بين المضافين والإسمنت المركب CPJ مع ظهور مشاكل الامتزاج والتجانس. تم العثور على الملدن المتفوق MasterGlenium Sky 841 ليكون أكثر فاعلية مع نطاقات جرعات أقل تشبع وأقصى تأثير على قابلية التدفق. بالإضافة إلى ذلك، استنتجنا أيضًا أن المواد المضافة المستخدمة تعمل على تحسين الأداء الميكانيكي للخرسانة.

الكلمات المفتاحية: المواد الملدنة، الإسمنت، التوافق، السلوك الريولوجي، جرعة التشبع، الخواص الميكانيكية.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

1. Introduction	3
2. Le béton.....	3
2.1. Les différents types de béton	3
2.2. Les principaux constituants du béton	4
2.2.1. Le ciment	4
2.2.1.1. Fabrication du ciment.....	4
A. Extraction et concassage.....	5
B. Broyage et séchage	5
C. Le préchauffage et la cuisson.....	5
D. Stockage du clinker et broyage du ciment.....	5
E. Le stockage et les expéditions.....	5
2.2.1.2. Les différents types du ciment	6
2.2.1.3. Composition minéralogique du ciment	7
2.2.1.4. Hydratation du ciment.....	7
A. Phase dormante	7
B. Début et fin de prise.....	7
C. Durcissement.....	7
2.2.1.5. Principales caractéristiques du ciment	8
2.2.1.6. Caractéristiques de la poudre	8
A. La surface spécifique (finesse de Blaine)	8
B. La masse volumique apparente	8
C. La masse volumique absolue	8
2.2.1.7. Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur « mortier normal ».....	8
A. Début de prise	8
B. L'expansion.....	8
C. Résistances mécaniques	8
2.2.1.8. Classes de résistance des ciments.....	8
2.3. Eau de gâchage	9
2.4. Le sable.....	10
2.4.1. Le sable utilisé en béton.....	10

2.4.2. Les différentes catégories du sable	10
2.5. Les granulats	10
2.5.1. Classification granulométrique	11
2.6. Les additions	11
2.6.1. Les différentes additions	11
A. Les fillers	11
B. Les additions calcaires	11
C. Les additions siliceuses	12
D. Les fumées de silice	12
E. Les métakaolins	12
F. Les cendres volantes	12
2.7. Les adjuvants	12
2.7.1. Historique.....	13
2.7.2. Le rôle des adjuvants	13
2.7.3. Les type d’adjuvants	14
2.7.3.1. Superplastifiants-hauts réducteurs d'eau	14
2.7.3.1.1. Mécanismes d’action des superplastifiants.....	14
2.7.3.1.2. Adsorption des super-plastifiants sur les grains de ciment.....	15
2.7.3.1.3. La répulsion électrostatique	16
2.7.3.1.4. L’encombrement stérique	16
2.7.3.1.5. Effet rhéologique	17
2.7.3.2. Les plastifiants-réducteurs d'eau	17
2.7.3.2.1. Mode d’action des plastifiants	18
2.7.3.3. Les accélérateurs de durcissement	19
2.7.3.4. Les retardateurs de prise.....	19
2.7.3.5. Les entraîneurs d'air	20
2.7.3.6. Les accélérateurs de prise.....	21
2.7.3.7. Les hydrofuges de masse.....	21
2.7.4. Compatibilité ciment/adjuvants	22
2.7.5. Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment.....	23
3. Notions de rhéologie	23
3.1. Géométrie de cisaillement	26
4. Comportement rhéologique des fluides.....	27
4.1. Les fluides.....	27
4.2. Différent types des fluides.....	27

4.2.1. Fluide newtonien.....	27
4.2.2. Fluide non newtonien.....	28
4.2.3. Fluide rhéfluidifiant	28
4.2.4. Fluide à seuil	28
4.2.5. Fluide rhéoépaississant	28
4.2.6. Fluide thixotropes	28
4.2.7. Fluide incompressible	29
4.3. Les modèles rhéologiques	29
4.3.1. Le modèle fluide de la loi de puissance	29
4.3.2. Bird-Carreau Modèle	29
4.3.3. Modèle de loi inter-puissances.....	29
4.3.4. Herschel-Bulkley Modèle	30

Chapitre II

1. Introduction	31
2. Les matériaux utilisés.....	31
2.1. Les ciments	31
2.1.1. Caractérisation des liants	31
2.1.1.1. Surface spécifique de Blaine	31
2.1.1.2. Fluorescence des rayons X.....	32
2.1.1.3. La consistance normale	32
2.1.1.4. Les délais de prise	33
2.1.1.4.1. Début et fin de prise.....	33
2.2. Les d'adjuvants.....	34
2.2.1. Caractérisation physicochimiques des adjuvants et coulis	34
2.2.1.1. Le potentiel hydrogène pH.....	34
2.2.1.2. L'extrait sec par étuvage	35
2.2.1.3. Densité des adjuvants	36
2.2.1.4. Etude rhéologique	36
A/ Méthode du Cône de Marsh.....	36
2.2.1.5. Mesure de la densité des coulis	38
3. Rhéométrie	38
4. Les granulats	40
4.1. Analyse granulométrique.....	40
Tamissage	40

Le tamisât.....	40
Le refus	40
Le refus ou le tamisât	40
5. Equivalent de sable.....	41
6. Préparation des mortiers.....	41
6.1. Caractérisation mécanique du mortier	42
7. Formulation du béton	43
7.1. Préparation des mélanges et confection des éprouvettes.....	45
7.2. Critère d'ouvrabilité du béton.....	45
8. Caractérisation du béton	46
8.1. Mesure de densité de béton frais	46
8.2. Résistance à la compression	47

Chapitre III

1. Caractérisation des ciments.....	48
1.1. Surface spécifique.....	48
1.2. Composition chimique et minéralogique.....	48
1.3. La consistance.....	49
1.4. Délais de prise	50
1.4.1 Début et fine de prise	50
2. Caractérisation des adjuvants	50
2.1. Mesure du pH	50
2.2. Extrait sec	50
2.3. La densité.....	51
3. Temps d'écoulement des coulis	51
4. Etude rhéométrique	54
5. Caractérisation du mortier.....	66
5.1. Masse volumique M_v	66
5.2. Résistance à la compression du mortier	67
6. Caractérisation du béton.....	68
6.1. Masse volumique M_v	68
6.2. Résistance à la compression du béton	68
Conclusion générale	71

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Les différents types de ciment	6
Tableau I.2 : Classes de résistance des ciments à la compression en MPa	9
Tableau I.3 : Valeurs limites applicables à chacun des résultats	9
Tableau I.4 : Les différentes catégories du sable	10
Tableau I.5 : Adjuvants normalisés modifiant la mise en œuvre du béton et du mortier	18
Tableau I.6 : Adjuvants normalisés modifiant la prise et le durcissement du ciment	22
Tableau I.7 : Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment	23

Chapitre II

Tableau II.1 : Quantités des produits utilisés	33
Tableau II.2 : Les quantités de chaque constituant.....	44

Chapitre III

Tableau III.1 : Surface spécifique et densité des trois ciments utilisés.....	48
Tableau III.2 : Compositions chimiques des ciments	48
Tableau III.3 : Composition minéralogique des ciments.	49
Tableau III.4 : Résultats des essais de consistance.....	49
Tableau III.5 : Résultats des essais des délais de prise	50
Tableau III.6 : Mesure de pH	50
Tableau III.7 : Résultats de l'essai d'extrait sec.....	50
Tableau III.8 : Résultats de mesure de la densité des adjuvants	51
Tableau III.9 : Temps d'écoulement des coulis à base du CPA.....	51
Tableau III.10 : Temps d'écoulement des coulis à base du CPJ	52
Tableau III.11 : Temps d'écoulement des coulis à base du CRS.....	53
Tableau III.12 : Résultats de mesure de la densité du mortier normalisé sans adjuvant.....	67
Tableau III.13 : Résultats de la résistance à la compression du mortier	67
Tableau III.14 : Masse volumique du béton non adjuvanté (échantillon témoin).....	68
Tableau III.15 : Masse volumique du béton adjuvanté par le superplastifiant MasterGlenium.....	68
Tableau III.16 : Masse volumique du béton adjuvanté par le plastifiant MasterPozzolith....	68
Tableau III.17 : Résistance à la compression R_c du béton témoin	69
Tableau III.18 : Résistance à la compression R_c du béton adjuvanté par le superplastifiant.	69
Tableau III.19 : Résistance à la compression R_c du béton adjuvanté par le plastifiant.....	69

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Béton à l'état frais	3
Figure I.2 : Les constituants principaux du béton.....	4
Figure I.3 : Fabrication du ciment Portland	5
Figure I.4 : Les étapes de la fabrication du ciment	6
Figure I.5 : Evolution de la résistance de béton en fonction du rapport E/C	9
Figure I.6 : Sable.....	10
Figure I.7 : Gravier roulé pour béton.	11
Figure I.8 : Adjuvant de béton.	12
Figure I.9 : Double couche électrochimique d'une particule colloïdale positivement chargée et évolution du potentiel électrostatique.....	15
Figure I.10 : Dispersion des grains de ciment par la répulsion électrostatique.	16
Figure I.11 : Dispersion des grains de ciment par encombrement stérique	16
Figure I.12 : Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment	17
Figure I.13 : Durcissement du béton avec et sans accélérateur	19
Figure I.14 : Effet d'un retardateur de prise en fonction de temps et de température	20
Figure I.15 : Rhéomètres : (a) <i>AR-G2 (TA Instruments)</i> ; (b) : <i>RheoStress 600 (Thermo Scientific)</i>	24
Figure I.16 : Evolution de la viscosité en fonction du taux de cisaillement d'une solution aqueuse de carraghénane à 1%.....	25
Figure I.17 : Suivi de la cinétique de gonflement/rupture d'une émulsion multiple grâce à la courbe de la viscosité de l'émulsion en fonction du temps.....	25
Figure I.18 : Détermination de la température de gélification à partir des modules élastique G' et visqueux G'' pour une suspension de nanoparticules lipidiques solides immergées dans un mélange de fluide simulé et de poloxamer 407.....	26
Figure I.19 : Géométries courantes de rhéomètres : cylindres coaxiaux, plateaux parallèles et cône-plan	27
Figure I.20 : Différents comportements rhéologiques des fluides	28

Chapitre II

Figure II.1 : Appareil SSB Toni technique	31
Figure II.2 : (a) Appareil de fluorescence X PANalytical (b) pastilleuse	32
Figure II.3 : (a) Appareil de Vicat (b) malaxeur.....	33
Figure II.4 : Mise en évidence du début de prise d'une pâte de ciment	34
Figure II.5 : pH-mètre.....	34

Figure II.6 : (a) Etuve de séchage (b) balance analytique	35
Figure II.7 : Mise en évidence de l'essai de densité	36
Figure II.8 : Fluidité des pâtes cimentaires à l'aide du cône de Marsh	37
Figure II.9 : Mise en œuvre de coulis adjuvantée.....	37
Figure II.10 : Densimètre.....	38
Figure II.11 : rhéomètre HAAKE Rheostress piloté par PC	39
Figure II.12 : Placement de l'échantillon dans le rhéomètre	39
Figure II.13 : Principe de l'essai d'équivalent de sable.....	41
Figure II.14 : (a) Sable normalisé (b) moules pour mortier.....	42
Figure II.15 : Machine hydraulique d'écrasement MATEST.....	43
Figure II.16 : Courbes granulométriques des différents constituants	44
Figure II.17 : Différents constituants du béton	45
Figure II.18 : Principe de l'essai au cône d'Abrams	46
Figure II.19 : Préparation et stockage des éprouvettes	46
Figure II.20 : Pesée de l'éprouvette du béton frais	47
Figure II.21 : (a) éprouvettes normalisées (b) machine d'écrasement.....	47

Chapitre III

Figure III.1 : Evolution du temps d'écoulement des coulis à base de CPA en fonction du type d'adjuvant et de sa teneur.....	52
Figure III.2 : Evolution du temps d'écoulement des coulis à base du CPJ en fonction du type d'adjuvant et sa teneur.....	52
Figure III.3 : Evolution du temps d'écoulement des coulis à base du CRS en fonction du type d'adjuvant et de sa teneur.....	53
Figure III.4 : Evolution de contrainte de cisaillement des coulis à base du CPA en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec le superplastifiant MasterGlenium	54
Figure III.5 : Evolution de contrainte de cisaillement des coulis à base du CRS en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec le superplastifiant MasterGlenium	55
Figure III.6 : Evolution de la contrainte de cisaillement des coulis à base du CPJ en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec le superplastifiant MasterGlenium	55
Figure III.7 : Mise en évidence du phénomène d'incompatibilité (Ciment/Adjuvant) rencontré.....	56
Figure III.8 : Variation de la viscosité des coulis à base du CPA en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec différentes teneurs de l'adjuvant MG.	57
Figure III.9 : Variation de la viscosité des coulis à base du CRS en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec différentes teneurs de l'adjuvant MG	57

Figure III.10 : Variation de la viscosité des coulis à base du CPJ en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec différentes teneurs de l'adjuvant MG	58
Figure III.11 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis à base du CPA en fonction de pourcentage du superplastifiant MG.	59
Figure III.12 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis à base du CRS en fonction de la teneur du superplastifiant MG	59
Figure III.13 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis à base du CPJ en fonction de la teneur du superplastifiant MG	60
Figure III.14 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse des coulis à base du ciment CPA contenant différentes teneurs en plastifiant MasterPozzolith.....	61
Figure III.15 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse des coulis du ciment CRS contenant différentes teneurs du plastifiant MasterPozzolith	61
Figure III.16 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse des coulis du ciment CPJ contenant différentes teneurs du plastifiant MasterPozzolith	62
Figure III.17 : Variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement des coulis à base du ciment CPA contenant le plastifiant MasterPozzolith	63
Figure III.18 : Variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement des coulis à base du ciment CRS contenant le plastifiant MasterPozzolith.....	63
Figure III.19 : Variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement des coulis à base du ciment CPJ contenant le plastifiant MasterPozzolith.....	64
Figure III.20 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis à base du ciment CPA en fonction du pourcentage du plastifiant.	65
Figure III.21 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis du ciment CRS en fonction du pourcentage du plastifiant	65
Figure III.22 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis à base du ciment CPJ en fonction du pourcentage du plastifiant.....	66
Figure III.23 : Résistance à la compression du mortier à base du ciment CPA en fonction de l'âge.....	67
Figure III.24 : Evolution de la résistance à la compression des trois bétons en fonction du temps de durcissement	69

Introduction générale

Introduction générale

A l'heure actuelle, le béton est le matériau manufacturé le plus consommé dans le monde. Il fait partie de notre vie quotidienne et il est, de ce fait, difficile d'imaginer devoir le remplacer à court terme par un matériau alternatif. L'amélioration des performances mécaniques et la durabilité du béton peut être obtenue en réduisant le vide interstitiel. En effet, la production de bétons de résistance adaptée et durables peut notamment être réalisée avec de faible rapport eau-ciment (E/C). Malheureusement, l'utilisation d'un ratio E/C réduit engendre une maniabilité compromise de ces bétons rendant difficile, voire impossible, leur mise en œuvre, surtout dans les structures de géométrie complexe. Cependant, le développement des adjuvants chimiques en particulier les plastifiants et les superplastifiants a permis de produire des bétons avec une excellente maniabilité à l'état frais sans pour autant compromettre les résistances mécaniques du béton à l'état durci.

L'utilisation des adjuvants dans l'industrie des matériaux cimentaires a révolutionné la technologie de ces matériaux. Aujourd'hui, plus de 95 % des bétons sont adjuvantés. Ils sont un catalyseur essentiel de l'évolution technologique des bétons, que ce soit au niveau des propriétés à l'état frais des bétons (facilité et confort de mise en œuvre), qu'en termes de performances mécaniques.

Un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5% de la masse du ciment) aux bétons, mortiers ou coulis, lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque la modification des propriétés du mélange, à l'état frais ou durci. Les adjuvants peuvent être classés en plusieurs catégories, telles que les plastifiants, les superplastifiants, les retardateurs de prise, les accélérateurs de prise, les entraîneurs d'air et les agents de surface. Chaque type d'adjuvants peut avoir un impact différent sur les propriétés du béton.

Les superplastifiants sont des réducteurs d'eau haut de gamme, utilisés pour la bonne dispersion des particules de ciment dans une suspension de béton. L'ajout de superplastifiants peut réduire le rapport eau-ciment du béton dans la plage de 0,25 à 0,30, sans affecter sa résistance et sa maniabilité. Cela augmente également la durabilité du béton. Ainsi, nous obtenons un béton homogène ouvrable à faible rapport eau-ciment, qui est moins sensible au ressuage et à la ségrégation. L'ajout de superplastifiants améliore non seulement les propriétés rhéologiques du béton mais lui confère éventuellement plus de compacité et de résistance à l'état durci.

La difficulté rencontrée dans la formulation des bétons consiste à choisir le couple ciment/(super)plastifiant le plus efficace permettant d'obtenir une réduction maximale de l'eau, une bonne ouvrabilité et une rhéologie satisfaisante du béton pendant le temps de mise en œuvre. Lors de l'utilisation de superplastifiants dans la confection des bétons à hautes performances par exemple, certains ciments en présence d'un certain type de superplastifiant peuvent parfois présenter des phénomènes d'incompatibilité ciment-superplastifiant : irrégularité des affaissements au cône d'Abrams initiaux et des temps de prise, et surtout, perte rapide de maniabilité après fabrication. Il faut donc tenir compte, dans la formulation des bétons, du comportement du couple ciment-superplastifiant qui met en cause la réactivité du ciment et l'efficacité du superplastifiant.

En outre, il est important de noter que l'utilisation des adjuvants peut également avoir des effets négatifs sur les propriétés du béton s'ils sont mal utilisés ou mal dosés. Par conséquent, il est important de comprendre les propriétés des adjuvants et de les utiliser correctement pour assurer

une qualité de béton optimale et c'est ce dont nous allons s'intéresser dans cette étude sur la façon dont les adjuvants affectent les propriétés des matériaux à base cimentaire.

L'objectif principal de la présente étude est d'étudier l'efficacité et la compatibilité du couple ciment/(super)plastifiant, et ce, à travers leurs comportements rhéologiques.

Outre l'introduction générale, ce mémoire est structuré en trois chapitres et une conclusion générale.

- Le premier chapitre est consacré à des généralités sur le béton et ses constituants en mettant l'accent notamment sur les adjuvants, leurs types ainsi que leurs mécanismes d'actions.
- Le second chapitre présente les matériaux utilisés ainsi que les méthodes et les protocoles expérimentaux suivis.
- Le 3^{ème} chapitre est dédié exclusivement à la présentation des résultats expérimentaux obtenus et leurs analyses et interprétations.

Chapitre I
Recherche
Bibliographique

1. Introduction

Le béton est le matériau le plus connu utilisé à des fins de construction. Il n'existe pas en tant que matériau de construction indépendant car il s'agit d'un mélange de plusieurs autres matériaux comme le ciment, les granulats, l'eau et souvent des adjuvants. C'est la raison pour laquelle le béton prêt à l'emploi est devenu très populaire ces dernières années pour accélérer le processus de construction et le rendre plus fiable. Le béton est utilisé pour fournir résistance, durabilité et polyvalence lors de la construction d'une structure. Ces excellentes propriétés ont fait de ce matériau un choix fiable et durable des entreprises de construction pour la réalisation d'ouvrages commerciaux et domestiques.

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu général sur le béton, ses différents constituants en mettant l'accent notamment sur les adjuvants et leurs mécanismes d'action. Des notions de base de rhéologie ont été également abordées.

2. Le béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants à savoir ciment, eau, granulats et le plus souvent, des adjuvants constituant ainsi un ensemble homogène. Ces composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m^3 ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0,4 μm (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons). Dans les bétons où une très grande compacité est recherchée (tels que les bétons à hautes performances BHP, par exemple), la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de 0,1 μm (fillers, fumée de silice). De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à 100 kg/m^3 .

La pâte (ciment + eau), élément actif du béton enrobe les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue à l'état frais (Figure I.1) le rôle de lubrifiant et de colle à l'état durci.



Figure I.1 : Béton à l'état frais [1]

2.1. Les différents types de béton

Suivant le dosage des constituants la destination, la masse volumique et le type d'armature utilisé, les bétons se distinguent en plusieurs types :

- Les bétons prêts à l'emploi ;
- Le béton armé ;
- Le béton fibré ;

- Le béton précontraint ;
- Les bétons hautes performances ;
- Le béton projeté ;
- Les bétons auto-compactants, autoplaçants et autonivelants ;
- Les bétons caverneux, drainant et poreux ;
- Le béton de ciment alumineux (ou béton fondu) ;
- Le béton décoratif [2].

2.2. Les principaux constituants du béton

La figure I.2 illustre les principaux constituants du béton avec leurs dosages approximatifs habituels.

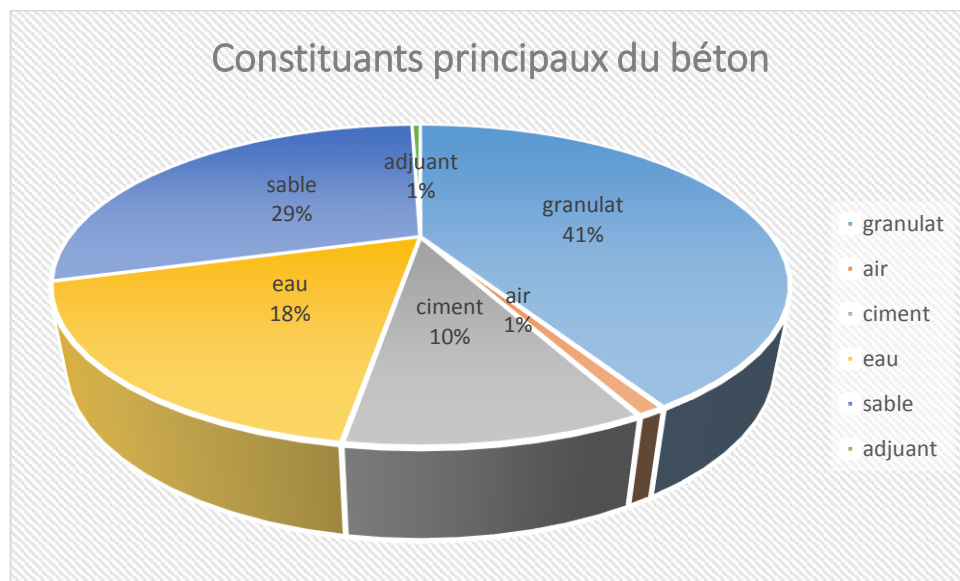


Figure I.2 : Les constituants principaux du béton

2.2.1. Le ciment

Le ciment est une poudre minérale fabriquée à partir du clinker (80% calcaire et 20% argile), obtenu par la combinaison chimique à très haute température 1450 °C de calcaire et d'argile. Le clinker est ensuite broyé avec des ajouts dans des proportions très précises, qui donneront au ciment des caractéristiques spécifiques.

2.2.1.1. Fabrication du ciment

Comme illustrée dans la figure I.3, la fabrication du ciment Portland passe par plusieurs étapes :

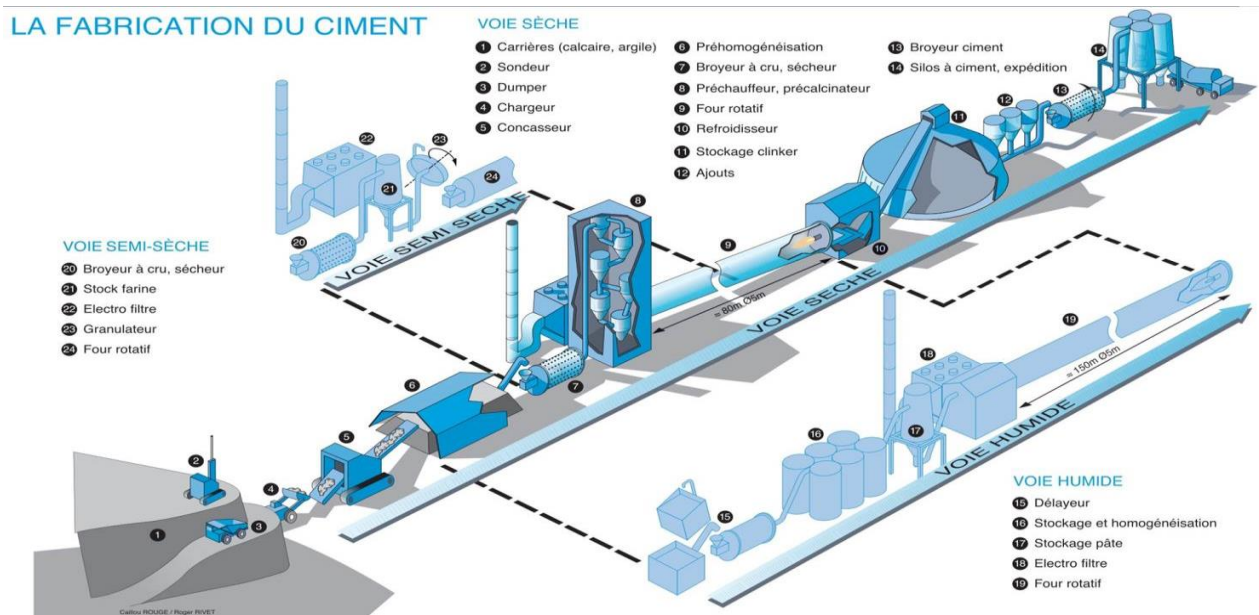


Figure I.3 : Fabrication du ciment Portland [3]

A. Extraction et concassage

Les deux matières premières de base à savoir le calcaire et l'argile sont extraites de carrière, les blocs obtenus sont réduits, à l'aide de concasseurs situés généralement sur les lieux mêmes de l'extraction, en éléments d'une dimension maximale de 80 mm.

B. Broyage et séchage

Les matières premières sont ensuite séchées et broyées très finement. On obtient la farine crue. Celle-ci sera plus tard introduite dans le four sous forme pulvérulente ou préalablement transformée en granules.

C. Le préchauffage et la cuisson

La farine est chauffée à environ 800 °C dans un préchauffeur, ensuite on introduit la farine chauffée dans un four rotatif où la température de la flamme avoisine 1450 °C.

Après une heure, la matière obtenue appelée clinker, passe dans un choc thermique (refroidissement).

D. Stockage du clinker et broyage du ciment

Le clinker refroidi est ensuite stocké dans un hall couvert ou dans des silos. Le clinker est broyé très finement dans un broyeur à boulets avec d'autres ajouts : cendres volantes de centrales thermiques, laitier de haut-fourneau, gypse, dont les pourcentages déterminent les différents types de ciment.

E. Le stockage et les expéditions

Enfin, le ciment est entreposé dans des silos de stockage avant d'être expédié en vrac ou en sacs aux chantiers où il sera commercialisé ou utilisé [4].



Figure I.4 : Les étapes de la fabrication du ciment [5].

2.2.1.2. Les différents types de ciment

Les différents types de ciment - pour la plupart disponibles en plusieurs classes de résistance - correspondent à la multiplicité des contraintes d'utilisation.

Tableau I.1 : Les différents types de ciment [6].

Désignation	Type de ciment	Teneur en clinker [%]	Teneur en % de l'un des ajouts : laitier, pouzzolanes, cendre, calcaire-schistes, fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment Portland	95 à 100		0 à 5%
CPJ-CEM II/A	Ciment portland composé	80 à 94	-De 6 à 20% de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10%	0 à 5%
CPJ-CEM II/B		65 à 79	-De 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0 à 5%
CHF-CEM III/A CHF-CEM III/B CHF-CEM III/C	Ciment de haut-fourneau	35 à 64	-36 à 65% de laitier de haut-fourneau	0 à 5%
		20 à 34	-66 à 80% de laitier de haut-fourneau	0 à 5%
		5 à 19	-81 à 95% de laitier de haut-fourneau	0 à 5%
CPZ-CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90	-10 à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10%	0 à 5%
CPZ-CEM IV/B		45 à 64	-36 à 55%	0 à 5%
CLC-CEM V/A CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64%	-18 à 30% de laitier	0 à 5%
		20 à 39%	-18 à 30% de cendres	0 à 5%

2.2.1.3. Composition minéralogique du ciment

Le ciment Portland contient quatre constituants principaux :

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (ou, par abréviation, C_3S).
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (ou C_2S).
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (ou C_3A).
- L'alumine-ferrite tétracalcique $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (ou C_4AF).

2.2.1.4. Hydratation du ciment

Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes. Par hydratation, les silicates tricalcique C_3S et bicalcique C_2S donnent du silicate monocalcique hydraté CSH, ainsi que de la chaux libre hydratée CH dite « Portlandite », formant un gel microcristallin à l'origine du phénomène [7]. Ce sont les cristaux de silicate monocalcique hydraté qui, en se fixant entre eux et aux constituants du matériau où ils ont pris naissance, confèrent à ce dernier sa résistance. C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques. Le matériau durci est une véritable « roche artificielle » qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures.

L'aluminate tricalcique C_3A donne quant à lui, par hydratation, de l'aluminate monocalcique hydraté, ainsi que de la chaux libre hydratée. L'aluminate monocalcique hydraté joue un rôle important dans le développement des résistances. Il contribue, par la rapidité relative de sa réaction, à la montée des résistances aux jeunes âges. Mais, il a l'inconvénient d'être accompagné d'un fort dégagement de chaleur et, surtout, celui de pouvoir se combiner avec les sulfates (s'ils sont présents dans le milieu environnant) pour donner du sulfo-aluminate tricalcique sous forme d'aiguilles d'ettringite qui conduisent à des gonflements dans le béton et, par la suite, à des dégradations dans la structure.

Quant à l'alumino-ferrite tétracalcique, son hydratation ne joue aucun rôle dans le durcissement du ciment.

Avant d'atteindre le stade final, l'évolution de l'hydratation du ciment passe par trois phases successives :

A. Phase dormante

La pâte de ciment (ciment + eau) reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à plusieurs heures, suivant la nature du ciment et la température). En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent, mais elles sont ralenties par la présence du gypse.

B. Début et fin de pris

Après une à deux heures, pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide.

C. Durcissement

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue de croître davantage en fonction du temps, mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

2.2.1.5. Principales caractéristiques du ciment

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur la pâte, soit sur le « mortier normal ».

2.2.1.6. Caractéristiques de la poudre

A. La surface spécifique (finesse de Blaine)

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment et se caractérise par la surface spécifique, ou surface développée, totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment, elle s'exprime en cm^2/g .

B. La masse volumique apparente

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1000 à 2000 kg/m^3 , en moyenne, pour un ciment.

C. La masse volumique absolue

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2900 à 3150 kg/m^3 suivant le type de ciment.

2.2.1.7. Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur « mortier normal »

A. Début de prise

Il est déterminé par l'instant où l'aiguille de Vicat – aiguille de 1 mm^2 de section et pesant 300 g – ne s'enfonce plus complètement au fond d'une pastille de pâte pure de ciment.

Suivant les types de ciment, le temps de début de prise doit être supérieur à 45 minutes ou à 1 heure.

B. L'expansion

Elle se mesure suivant un essai normalisé et grâce aux aiguilles de *Le Chatelier*. Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment.

L'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments.

C. Résistances mécaniques

Elles sont mesurées sur éprouvettes de mortier normal et caractérisent, de façon conventionnelle, la résistance du ciment définie par sa valeur nominale. Cette valeur est la limite inférieure de résistance en compression à 28 jours.

2.2.1.8. Classes de résistance des ciments

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 – 42,5 – 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa.

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ N}/\text{mm}^2 = 10 \text{ bars}$).

Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, il est fixé une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours, comme indiqué dans le tableau I.2. Pour chaque classe de résistance courante, deux classes de résistance à court terme sont définies, une classe avec résistance à court terme ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance à court terme élevée (indiquée par la lettre R) [7].

Tableau I.2 : Classes de résistance des ciments à la compression en MPa. [7]

Désignation de la classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours
32.5N	-	≥ 16	≥ 32.5
32.5R	≥ 10	-	
42.5N	≥ 10	-	≥ 42.5
42.5R	≥ 20	-	
52.5N	≥ 20	-	≥ 52.5
52.5R	≥ 30	-	

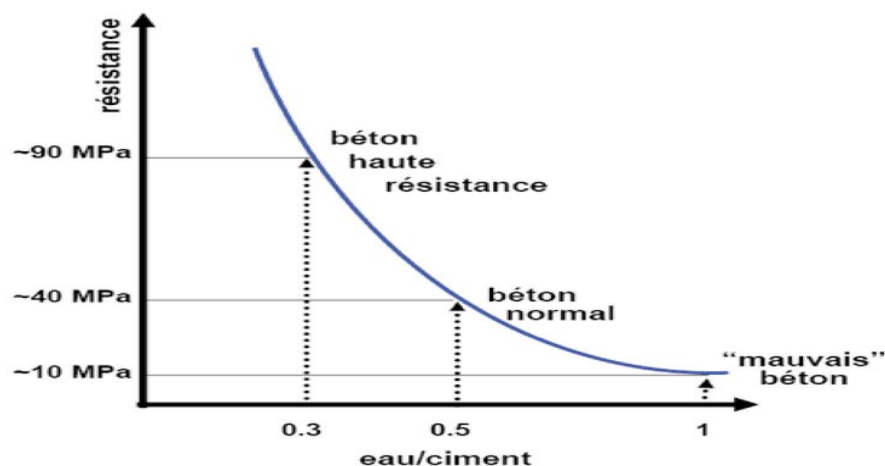
Tableau I.3 : Valeurs limites applicables à chacun des résultats. [7]

Échéances	Classes de résistance					
	32.5N	32.5R	42.5N	42.5R	52.5N	52.5R
2 Jours	-	8	8	18	18	28
7 Jours	14	-	-	-	-	-
28 Jours	30	30	40	40	50	50

2.3. Eau de gâchage

L'eau est nécessaire car elle confère au béton une ouvrabilité adéquate et permet les réactions d'hydratation du ciment qui conduisent à la prise et au durcissement, le dosage doit faire preuve d'une attention particulière : trop d'eau dans le béton entraîne la naissance de fissures et diminue la résistance au moment du séchage.

L'eau a une influence directe sur la résistance initiale du béton à travers le rapport E/C (quantité d'eau/quantité de ciment), elle est observable sur le graphique de la figure I.5. Pas besoin de grandes explications pour comprendre que trop peu d'eau offrira peu de résistance, car la réaction n'aura pas lieu et ajouter trop d'eau (soit dépasser le facteur $E/C=0.5$) fera chuter très rapidement en résistance et le béton risquera de ne plus résister aux charges [8].

**Figure I.5 : Evolution de la résistance de béton en fonction du rapport E/C [8]**

2.4. Le sable

Généralement, le sable utilisé pour la fabrication du béton est le sable de rivière ou de carrière, le sable marin peut contenir des éléments néfastes (chlorures) pour le béton et les mortiers.



Figure I.6 : Sable [9]

2.4.1. Le sable utilisé en béton

Il existe en effet des sables bien plus petits dont le diamètre est inférieur à 100 μm . Mais un sable trop petit n'est pas forcément adapté pour la construction.

Alors, on utilise principalement des gammes de sable comprises entre 0 et 5 mm de diamètre.

Le sable 0/4 peut être issu des lits de rivière ou du concassage. Il est vendu pour être utilisé dans la construction. [10]

2.4.2. Les différentes catégories du sable

Le tableau I.4 présente les types de sable selon la dimension des particules qu'il contient.

Tableau I.4 : Les différentes catégories du sable [10].

Granulométrie du sable	Type de sable	Exemple d'utilisation
Sable 0/1	Sable fin	Scellement, jointement
Sable 0/2	Sable moyen	Scellement, jointement, enduit
Sable 0/4	Sable grossier	Dalle, terrasse, fondation, chape, béton de propreté, voile, poutre, colonne, linteau
Sable 0/5	Sable grossier	Mortier de scellement pour tuile, dalle, béton

2.5. Les granulats

Les granulats sont des grains minéraux classés en fillers, sablons (sable fin), sables, gravillons, graves (mélange de sable et de gravillon) ou ballasts, suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 125mm, ce sont des matériaux de construction inertes qui constituent de façon schématique le squelette du béton. Le ciment mélangé à l'eau jouant le rôle de colle entre les granulats. Les granulats (granulats

roulés ou granulats concassés) sont quelquefois encore appelés « agrégats », cependant cette appellation tend à être abandonnée [11].



Figure I.7 : Gravier roulé pour béton. [12]

2.5.1. Classification granulométrique

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminée par criblage sur des tamis de contrôle normalisés à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres, Ils sont désignés par d et D qui représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions des grains constituant le granulat. Ils sont appelés d/D ou O/D lorsque d est inférieur à deux millimètres [11].

2.6. Les additions

Les additions destinées à être incorporées dans les bétons sont des matériaux fins à très fins d'origine minérale, elles participent à une amélioration de la durabilité par une réduction de la taille des pores, elles apportent généralement un accroissement de résistance conséquence de l'augmentation de la compacité et leur pouzzolanicité ou de leur hydraulicité plus ou moins importante.

2.6.1. Les différentes additions

A. Les fillers

Les fillers sont obtenus par broyage fin de roches naturelles.

- D'origine siliceuse ;
- D'origine calcaire.

B. Les additions calcaires

Les additions calcaires sont obtenues par broyage de roches sédimentaires carbonatées : calcaires ou dolomitiques, Elles sont utilisées pour améliorer l'ouvrabilité des bétons frais ainsi que la régularité esthétique et la teinte des parements.

C. Les additions siliceuses

Les additions siliceuses sont obtenues par broyage de quartz ou de cristobalite calcinée, Elles améliorent l'ouvrabilité, la compacité et la résistance mécanique des bétons dans lesquels elles sont incorporées.

D. Les fumées de silice

Les fumées de silice proviennent de la réduction du quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium ou d'alliage de ferrosilicium.

E. Les métakaolins

Les métakaolins sont issus de la calcination (puis du broyage) d'une argile kaolinique à des températures comprises entre 600 et 900 °C, Il existe deux types de métakaolins : ceux issus d'une calcination en four horizontal et ceux issus d'une calcination flash, Les propriétés du métakaolin et en particulier sa finesse permettent d'optimiser l'empilement granulaire de la formulation, d'améliorer les propriétés de transfert du béton telles que la perméabilité et la diffusion des ions chlorures et la résistance aux attaques chimique (acide et sulfate).

F. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé (centrales thermiques de production d'électricité), Selon le type de charbon et de chaudière, on récupère des cendres volantes siliceuses, silico-calciques ou calciques. Seules les cendres siliceuses ont des propriétés pouzzolaniques. L'utilisation de cendres volantes permet d'améliorer l'ouvrabilité du béton frais, d'augmenter sa compacité et de réduire la chaleur d'hydratation (donc de limiter le risque de fissuration). Elles améliorent également la résistance aux eaux sulfatées [13].

2.7. Les adjuvants

Les adjuvants de béton sont des substances ajoutées au béton pour améliorer ses propriétés physiques et chimiques. Les adjuvants peuvent être ajoutés au béton au moment du mélange pour améliorer sa maniabilité, sa résistance, sa durabilité et sa finition. Les adjuvants peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leurs nature chimique et de leurs effets sur les propriétés du béton. Ils peuvent être à l'état liquide (Figure I.8) mais aussi à l'état pulvérulent.



Figure I.8 : Adjuvant de béton [14]

2.7.1. Historique

Dès les origines de la fabrication du béton de ciment Portland, commencent les recherches sur l'incorporation de produits susceptibles d'améliorer certaines de ses propriétés. On cherche à agir sur les temps de prise, les caractéristiques mécaniques et de mise en œuvre et la porosité. Dès 1881, *Candlot* étudia l'action des accélérateurs et des retardateurs de prise. Le sucre est déjà connu comme retardateur de prise et souvent employé à partir de 1909. Entre 1910 et 1920, débute la commercialisation d'hydrofuges et d'accélérateurs à base de chlorure de calcium. A partir de 1930, les entraîneurs d'air sont fréquemment utilisés. Ils seront suivis par les antigels et les produits de cure. Depuis 1960, avec le développement du béton préfabriqué et du béton prêt à l'emploi, les adjuvants prennent une place grandissante. Le contrôle des adjuvants est vite devenu une nécessité. En 1964, est créée la COPLA (Commission Permanente des Liants hydrauliques et des Adjuvants du béton). Elle était chargée de l'agrément et du contrôle des adjuvants ayant une réelle efficacité et pouvant être employés en toute sécurité et d'en établir la liste officielle. Le développement des normes d'adjuvants à partir de 1972 a abouti en 1984 à la mise en place d'une certification par la marque NF Adjuvants, véritable label de qualité. La liste des adjuvants bénéficiant de la marque NF est publiée régulièrement par l'AFNOR. Il faut enfin préciser que les adjuvants ont permis des progrès spectaculaires sur les propriétés des bétons et d'étendre leur champ d'application. La création du Seynod (Syndicat national des Adjuvants pour Mortiers et Bétons), en 1968, a contribué à faire connaître et à développer l'utilisation des adjuvants pour la réalisation de bâtiments et de structures de génie civil.

2.7.2. Le rôle des adjuvants

Les adjuvants de béton sont des produits chimiques ajoutés au mélange de béton pour améliorer ses propriétés et ses performances. Voici quelques rôles importants des adjuvants de béton :

- Réduire la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance de béton désirée : Les adjuvants réducteurs d'eau (également appelés plastifiants) permettent de réduire la quantité d'eau nécessaire pour mélanger le béton, tout en améliorant la fluidité et la maniabilité du béton frais.
- Améliorer la résistance et la durabilité du béton : Les adjuvants de renforcement (comme les super plastifiants, les accélérateurs de durcissement et les retardateurs de prise) aident à améliorer la résistance à la compression, la résistance à la traction et la durabilité du béton.
- Réduire la fissuration du béton : Les adjuvants de réduction de fissuration réduisent la probabilité de fissuration du béton en contrôlant la contraction du béton pendant le durcissement et en améliorant l'adhérence entre le béton et l'armature métallique.
- Améliorer la résistance aux conditions environnementales : Les adjuvants résistants aux intempéries (comme les inhibiteurs de corrosion et les agents hydrofuges) aident à protéger le béton contre les dommages causés par les conditions environnementales, telles que l'eau, le gel et la chaleur.
- Faciliter la mise en œuvre et réduire les coûts : Les adjuvants peuvent aider à réduire les coûts de production et de mise en œuvre du béton en réduisant le temps de coulage, en améliorant la maniabilité et en facilitant le transport et la pompe du béton.
- En résumé, les adjuvants de béton sont des produits chimiques très utiles qui permettent d'améliorer la qualité, la performance et la durabilité du béton, tout en réduisant les coûts et en facilitant la mise en œuvre [15].

2.7.3. Les type d'adjuvants

2.7.3.1. Superplastifiants-hauts réducteurs d'eau

Les super-plastifiants hauts réducteurs d'eau sont des additifs chimiques utilisés dans la fabrication de béton pour réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication de béton sans compromettre la qualité ou la résistance du matériau. Ces produits sont également connus sous le nom de super-plastifiants, d'agents de réduction d'eau à haute performance ou de fluidifiants de hautes performances.

Les super-plastifiants hauts réducteurs d'eau sont généralement des polymères synthétiques tels que les sulfonates de naphthalène-formaldéhyde, les sulfonates de mélamine-formaldéhyde ou les poly carboxylates. Ces additifs sont capables de disperser les particules de ciment dans l'eau de manière à réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication de béton. En général, ces produits peuvent réduire la quantité d'eau nécessaire de 12% à 30%, ce qui permet d'obtenir un béton plus résistant et plus durable. Ils permettent entre autres :

- de réduire très fortement la quantité d'eau de gâchage tout en maintenant la maniabilité.
- d'augmenter la maniabilité tout en conservant les performances.
- de réaliser des bétons à compacité élevée, permettant des gains de performance très importants en terme de : résistances mécaniques initiales et finales élevées - diminution de la porosité et - accroissement de la durabilité.

Les Domaines d'application sont les suivants :

- Béton Prêt à l'Emploi BPE ;
- Bétons de Haute Performance BHP et Bétons de Très Haute Performance BTHP.
- Bétons autonivelants BAN - Bétons Autobloquants ;
- Bétons d'ouvrages d'art ;
- Bétons de dallages industriels ;
- Bétons de bâtiment ;
- Bétons précontraints ;
- Bétons pompés ;
- Bétons pour fondations profondes ;
- Bétons pour ouvrages fortement ferrailés ;
- Bétons soumis à des milieux agressifs ;
- Bétons architectoniques.

Leur dosage moyen est compris entre 0.8 à 3% du poids du ciment [16].

2.7.3.1.1. Mécanismes d'action des superplastifiants

Le pouvoir fluidifiant des super-plastifiants s'exerce par une combinaison de phénomènes physiques se produisant instantanément (à $t = 0$). Ces processus sont l'adsorption des super plastifiants, la répulsion électrostatique et l'encombrement stérique. La dispersion des particules de ciment par les

super-plastifiants conduit à une évolution des propriétés rhéologiques des pâtes et mortiers de ciment. [17]

2.7.3.1.2. Adsorption des super-plastifiants sur les grains de ciment

L'étude de l'effet dispersant des super-plastifiants, menée par Flatt et al [18]. Sur des suspensions modèles, a montré que seuls les super-plastifiants adsorbés contribuaient à la dispersion. Les molécules de super-plastifiant doivent d'abord s'adsorber à la surface des grains de ciment et seulement après elles peuvent exercer leur pouvoir fluidifiant. Une pâte de ciment peut être envisagée comme une dispersion de particules colloïdales dans l'eau. La surface des grains de ciment porte des charges électriques, lesquelles ont pour origine des imperfections de la structure cristalline, des liaisons dissociées ou des ions adsorbés. Cette charge confère à la particule un potentiel de surface, appelé potentiel de Nernst et noté ' ψ_0 '. Les électrolytes, présents dans la phase aqueuse, vont alors former une couche autour de la particule afin de neutraliser ce potentiel électrostatique et stabiliser ainsi la dispersion. Cette couche est appelée la double couche électrochimique. La particule est entourée par une couche fixe de molécules d'eau et d'ions adsorbés sous l'effet de l'attraction électrostatique (Voir Figure I.9). Cette couche est appelée couche de Stern, elle se divise en deux couches distinctes : les couches d'Helmholtz interne et externe. La couche d'Helmholtz interne est formée d'anions non solvatés. La couche d'Helmholtz externe est constituée par une monocouche de cations solvatés. En raison de leur taille relativement importante, les ions ne peuvent pas neutraliser complètement la charge de la particule colloïdale. La compensation est réalisée au sein de la couche diffuse. Dans cette couche, les ions sont mobiles et leurs concentrations évoluent avec la distance, de telle façon qu'à la fin de la couche diffuse, l'électro neutralité est atteinte.

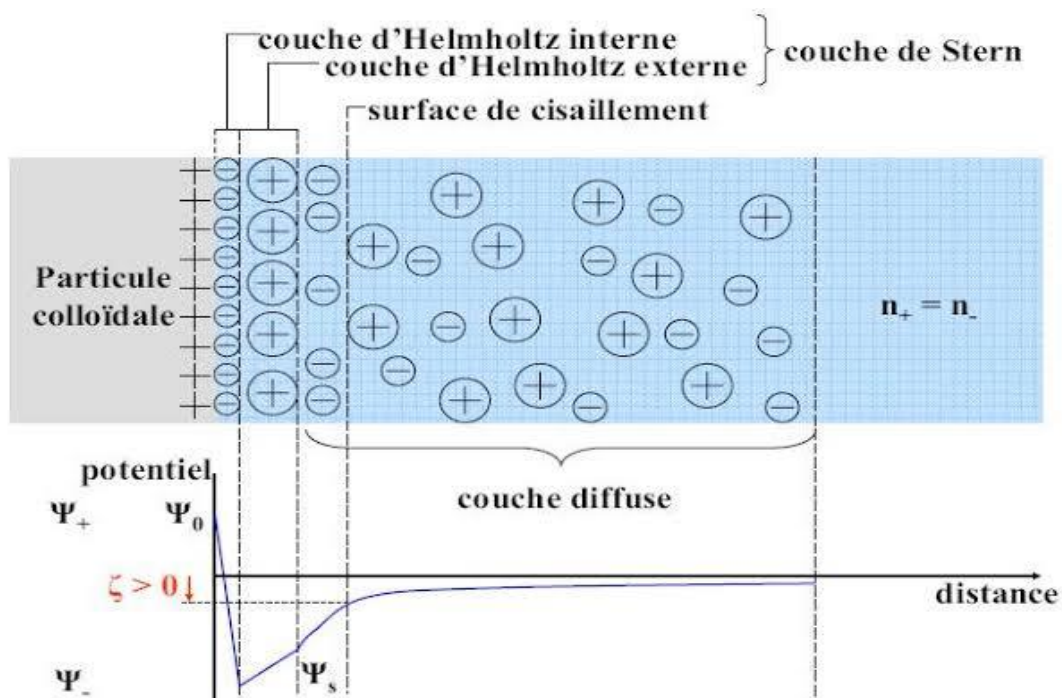


Figure I.9 : Double couche électrochimique d'une particule colloïdale positivement chargée et évolution du potentiel électrostatique [19].

2.7.3.1.3. La répulsion électrostatique

La dispersion engendrée par les superplastifiants de type polysulfonate est majoritairement due à la répulsion électrostatique. Les superplastifiants s'adsorbent à la surface des particules de ciment par des interactions coulombiennes, des interactions de *Van der Waals* ou des liaisons hydrogènes. En se fixant sur les grains de ciment, les polymères anioniques changent la charge des particules de ciment.

Entre chaque grain de ciment occupé par les polymères, une force répulsive se forme en raison des charges identiques. Cette force provoque une forte dispersion des particules et empêche ainsi la coagulation. La dispersion des grains de ciment est représentée schématiquement dans la figure I.10 [20].

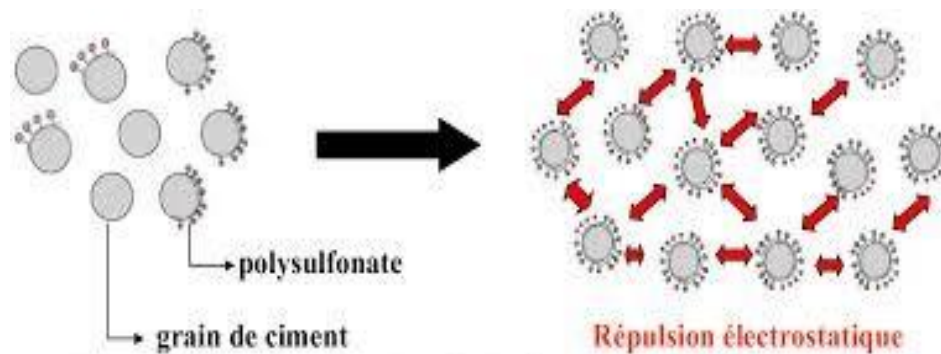


Figure I.10 : Dispersion des grains de ciment par la répulsion électrostatique. [19]

2.7.3.1.4. L'encombrement stérique

L'encombrement stérique est le type de répulsion créée par les superplastifiants de type polycarboxylate. Les polymères anioniques s'adsorbent à la surface des particules et les chaînes secondaires s'étendent aux alentours. Lors du rapprochement de deux grains de ciment, les couches d'adsorption des super-plastifiants se chevauchent. La densité de chaînes augmente et les molécules d'eau vont s'accumuler dans la solution. Cela a pour conséquence l'apparition d'une pression osmotique, laquelle maintient les particules séparées l'une de l'autre. L'encombrement stérique apparaît dès que la distance entre les polymères adsorbés est inférieure à deux fois l'épaisseur des polymères comme illustré dans la figure I.11. L'encombrement stérique est donc une force purement répulsive, qui n'agit que si les molécules sont très proches [21].

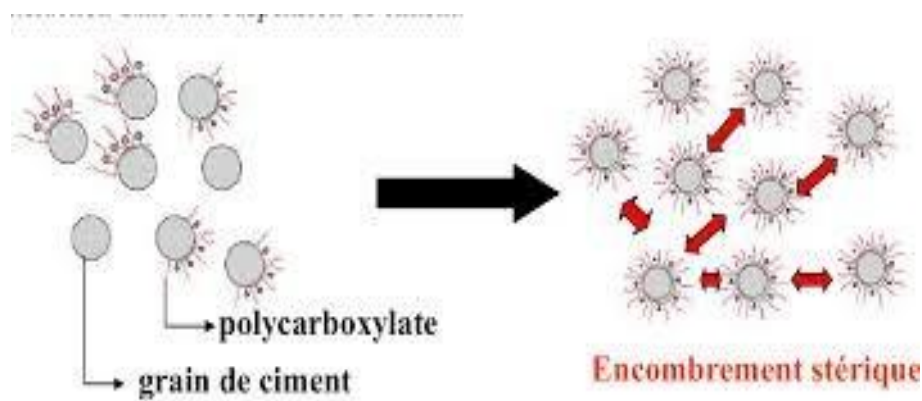


Figure I.11 : Dispersion des grains de ciment par encombrement stérique [19].

2.7.3.1.5. Effet rhéologique

En l'absence de superplastifiant, les particules de ciment s'agglomèrent en raison des charges opposées présentes à leurs surfaces. Ce phénomène va se traduire par un seuil d'écoulement au niveau des propriétés rhéologiques. En présence de superplastifiant, 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 [22].

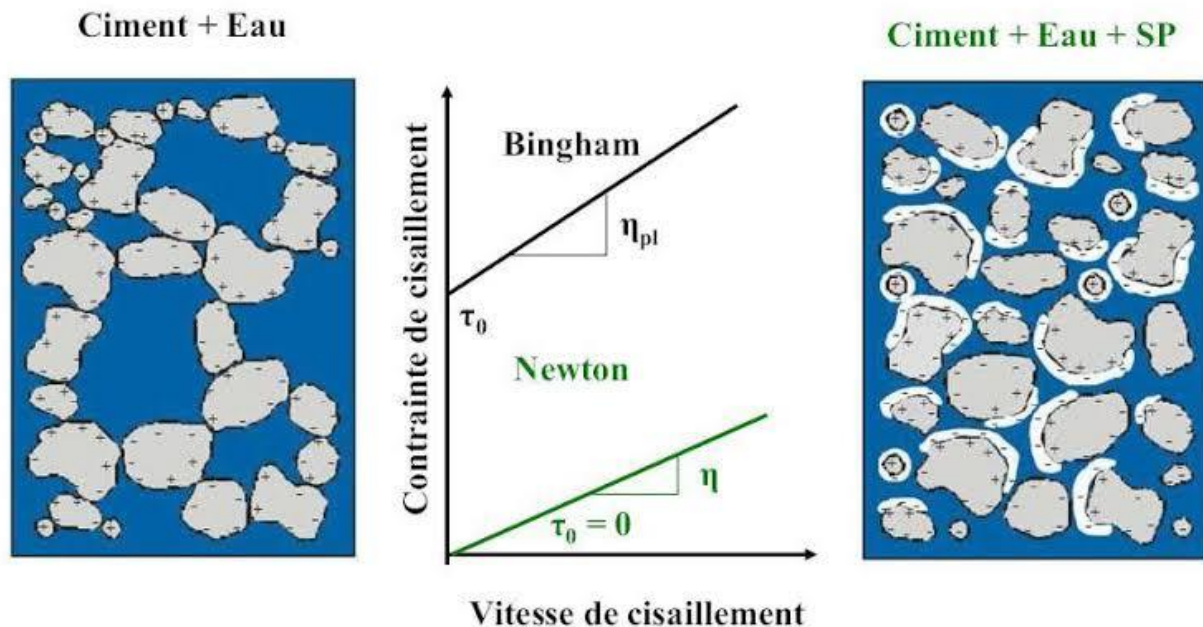


Figure I.12 : Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [19].

2.7.3.2. Les plastifiants-réducteurs d'eau

Les plastifiants et les réducteurs d'eau sont des adjuvants couramment utilisés dans la fabrication de béton et de mortier.

Les plastifiants sont des additifs qui modifient les propriétés du béton en réduisant la quantité d'eau nécessaire pour produire un mélange de béton fluide. Ils permettent ainsi d'améliorer la maniabilité du béton, de réduire la teneur en eau nécessaire pour le couler et de renforcer sa résistance mécanique. Les réducteurs d'eau, quant à eux, sont également des additifs qui permettent de réduire la quantité d'eau nécessaire pour produire un mélange de béton, mais sans altérer la maniabilité du béton. Ils permettent ainsi de produire un béton plus résistant tout en réduisant la quantité d'eau utilisée.

Les plastifiants et les réducteurs d'eau sont souvent utilisés ensemble pour optimiser les propriétés du béton, en permettant de réduire la quantité d'eau nécessaire tout en améliorant la maniabilité et la résistance mécanique du béton. , Ils permettent :

- D'augmenter la compacité du béton entraînant une amélioration des résistances ;
- De faciliter la mise en place du béton ;
- D'augmenter la maniabilité tout en réduisant l'eau de gâchage ;
- De réduire la ségrégation.

Les domaines d'application sont les suivants :

- Béton prêt à l'emploi BPE ;
- Bétons architectoniques ;
- Bétons d'ouvrages d'art courants jusqu'à B40 ;
- Bétons de bâtiment ;
- Bétons manufacturés ;
- Bétons routiers ;
- Béton projeté.

Leur dosage moyen est compris entre 0.3 à 0.5% du poids du ciment [16].

2.7.3.2.1. Mode d'action des plastifiants

Au contact de l'eau les grains de ciment s'agglomèrent naturellement car ils sont attirés les uns avec les autres par des forces électrostatiques (phénomène de floculation). Ces floccs piègent une partie de l'eau de gâchage qui ne va pas être disponible pour apporter de la fluidité au béton.

Lorsqu'on ajoute du plastifiant, celui-ci va défloculer une partie des grains de ciment par effet de répulsion électrostatique. L'eau piégée par les floccs est alors libérée, générant ainsi une augmentation de la fluidité [23].

Tableau I.5 : *Adjuvants normalisés modifiant la mise en œuvre du béton et du mortier*

	Plastifiants	Superplastifiants
Dosage en % de la masse du ciment	Généralement < 0,5 %	Généralement 0,5 % à 3 %
Introduction	Dans l'eau de gâchage	Dans le béton avant sa mise en œuvre
Effet sur la mise en œuvre du béton	À maniabilité constante réduction du béton d'eau > 6,5 %	À rapport eau/ciment constant grande fluidification du béton gain d'affaissement d'au moins 80 mm
Résistance sur toutes les échéances	-Supérieures à celles du témoin. -Augmentation minimum de 10 %.	Par rapport au témoin légère diminution possible.
Effet secondaire favorable	-Augmentation de compacité, diminution de la perméabilité -Possibilité d'améliorer la résistance du béton aux agents chimiques	L'emploi de ces adjuvants peut permettre de réaliser des bétons à Hautes Performances en utilisant de faibles agressifs rapports eau/ciment
Autre effet	Possibilité d'une légère augmentation de retrait	

2.7.3.3. Les accélérateurs de durcissement

Les accélérateurs de durcissement sont des additifs qui sont utilisés dans la fabrication de béton et de mortier pour accélérer le processus de durcissement du matériau. Ils peuvent être utilisés dans des situations où une prise et un durcissement rapides sont nécessaires, par exemple pour réduire le temps de mise en place du béton, pour accélérer la livraison d'un projet ou pour réduire le temps de séchage.

Les accélérateurs de durcissement fonctionnent en accélérant la réaction chimique entre l'eau et le ciment dans le béton, ce qui entraîne une prise et un durcissement plus rapides. Ils peuvent également améliorer la résistance initiale du béton. , ils permettent :

- d'accroître la vitesse de montée en résistance du béton.

Les Domaines d'application sont les suivants :

- Béton prêt à l'emploi BPE ;
- Bétons nécessitant une résistance à court terme ;
- Bétons pour décoffrages rapides ;
- Bétons précontraints.

Leur dosage moyen est de 0,8 à 2 % du poids du ciment [16].

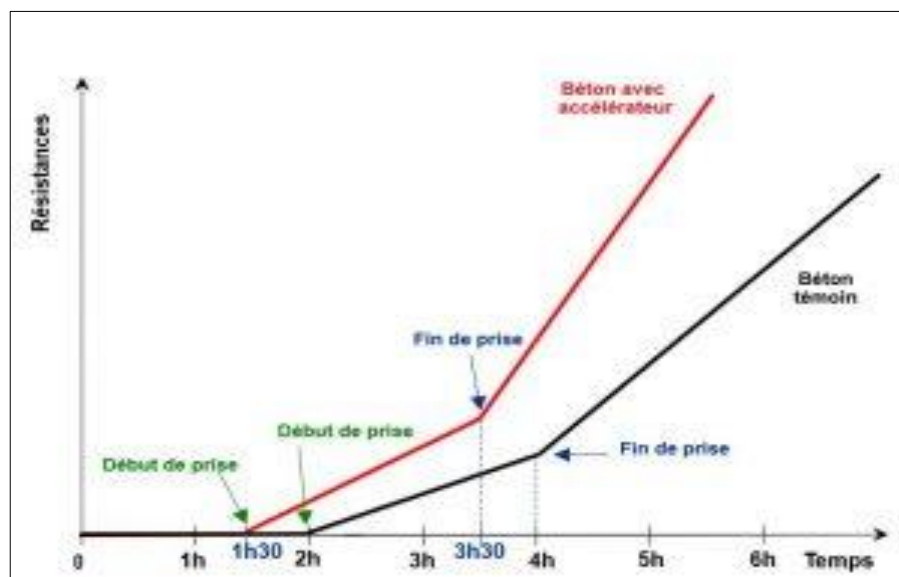


Figure I.13 : Durcissement du béton avec et sans accélérateur.

2.7.3.4. Les retardateurs de prise

Les retardateurs de prise sont des additifs utilisés dans la fabrication de béton et de mortier pour retarder le processus de prise et de durcissement du matériau. Ils sont souvent utilisés dans des situations où une prise retardée est nécessaire, par exemple pour permettre un temps de travail prolongé ou pour réduire les risques de fissuration ou d'endommagement du béton.

Les retardateurs de prise fonctionnent en ralentissant la réaction chimique entre l'eau et le ciment dans le béton, ce qui retarde la prise et le durcissement du matériau. Les retardateurs de prise courants

incluent le sucre, le gluconate de sodium, le tartrate de sodium, le borax et les acides organiques. Ils permettent :

- D'augmenter le temps de début de prise ;
- De réguler le dégagement de chaleur due à l'hydratation du ciment.

Les domaines d'application sont les suivants :

- Béton prêt à l'emploi BPE,
- Bétons pompés,
- Bétons pour ouvrages de masse,
- Coulage du béton en continu,
- Coulage de béton par temps chauds.
- Transports sur longues distances

Leur dosage moyen est de 0,2 à 0,5% du poids du ciment. [16].

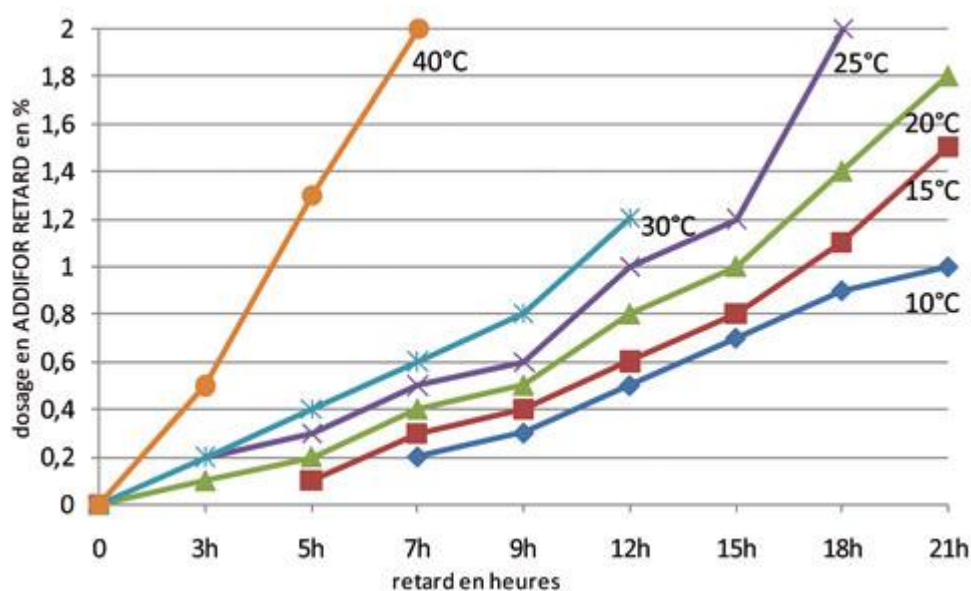


Figure I.14 : Effet d'un retardateur de prise en fonction de temps et de température.

2.7.3.5. Les entraîneurs d'air

Les entraîneurs d'air sont des additifs utilisés dans la fabrication de béton et de mortier pour introduire de petites quantités d'air dans le matériau, créant ainsi des espaces vides dans la matrice du béton. Ces espaces vides aident à améliorer la résistance du béton à la compression, à l'abrasion et au gel-dégel, ainsi qu'à réduire la possibilité de fissuration due à la contraction.

Les entraîneurs d'air fonctionnent en créant de minuscules bulles d'air dans le béton lors du brassage. Ces bulles peuvent être de différentes tailles et formes, et leur taille et leur nombre dépendent de la quantité et du type d'entraîneur d'air utilisé. Ils permettent :

- D'entraîner, à l'intérieur du béton, des microbulles d'air parfaitement réparties qui serviront de vase d'expansion dans le béton durci,
- d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et des sels de déverglaçage,
- de faciliter la mise en œuvre du béton.

Les domaines d'application sont les suivants :

- Bétons prêts à l'emploi BPE ;
- Bétons d'ouvrages d'art exposés aux cycles gel/dégel (association avec un super plastifiant recommandée) ;
- Bétons devant résister aux cycles de gel et de dégel ;
- Bétons extrudés ;
- Bétons routiers.

Leur dosage moyen est de 0,05 à 0,2 % du poids du ciment [16].

2.7.3.6. Les accélérateurs de prise

Les accélérateurs de prise sont des additifs utilisés dans la fabrication de béton et de mortier pour accélérer le processus de prise et de durcissement du matériau. Ils sont souvent utilisés dans des situations où une prise rapide est nécessaire, par exemple pour réduire le temps de mise en place du béton ou pour permettre une utilisation précoce de la surface en béton.

Les accélérateurs de prise fonctionnent en accélérant la réaction chimique entre le ciment et l'eau dans le béton, ce qui entraîne une prise et un durcissement plus rapides du matériau. Les accélérateurs de prise courants comprennent les chlorures, les nitrates, les formates et les acétates. Ils permettent :

- de réduire les temps de prise,
- de mettre le béton hors gel,
- d'augmenter la rotation des coffrages.

Leurs domaines d'application sont les suivants :

- Béton prêt à l'emploi BPE ;
- Bétons hors gel ;
- Bétons à hautes performances initiales BHP ;
- Bétons manufacturés ;
- Bétons pour travaux en zones de marnage ;
- Bétons par temps froids.

Leur dosage moyen est de 1 à 3 % du poids du ciment.

2.7.3.7. Les hydrofuges de masse

Les hydrofuges de masse permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques, ils permettent :

- de réduire la perméabilité et l'absorption capillaire du béton,
- de réduire l'apparition des efflorescences.

Les domaines d'application sont les suivants :

- Béton prêt à l'emploi BPE ;
- Bétons étanches dans la masse, fondations, radiers, réservoirs ;
- Bétons manufacturés : bordures, pavés,

Leur dosage moyen est de 0,5 à 2% du poids du ciment. [16]

Tableaux I.6 : Adjuvants normalisés modifiant la prise et le durcissement du ciment [24].

		Accélérateurs de prise	Accélérateurs de durcissement	Retardateurs de prise
Dosage/masse de ciment		1 à 3 %	0,2 à 3 %	0,1 à 1 %
Introduction		Dans l'eau de gâchage		
Effets sur la prise		Accélération variable suivant les dosages, les types de ciments et les températures		Retards très variable suivant dosages, ciments, températures.
Effet sur les résistances	Initiales (avant 3 jours)	Augmentées à 1 ou 2 jours.	Augmentées.	Diminuées à 1 ou 2 jours.
	Finales (avant 28 jours)	Légèrement diminuées (d'autant plus que la prise aura été accélérée)	Inchangées ou légèrement diminuées	Légèrement augmentées.
Effets secondaires favorables				Amélioration de maniabilité avec possibilité de réduction d'eau
Autres effets		Possibilité d'une légère augmentation de retrait		

2.7.4. Compatibilité ciment/adjuvants

Dès fois le béton fait face à des problèmes de compatibilité de ces constituants tels l'incompatibilité ciment / adjuvants lorsque ce dernier est ajouté. Il peut y avoir aussi incompatibilité entre l'ajout cimentaire et l'adjuvant.

La difficulté majeure qu'on rencontre dans la formulation du béton à base des adjuvants est de choisir le couple ciment-adjuvants le plus efficace qui permet d'obtenir une réduction maximale d'eau, une bonne ouvrabilité et une rhéologie satisfaisante du béton pendant la mise en œuvre.

En effet, lors de l'utilisation de l'adjuvant dans la confection du béton, certains ciments peuvent présenter des phénomènes d'incompatibilité ciment-adjuvants : irrégularité de l'affaissement au cône d'Abram et des temps de prise ainsi qu'une perte rapide de maniabilité après fabrication.

La formulation des bétons adjuvant dépend du comportement du couple ciment-adjuvants. Ce comportement est fonction de la réactivité du ciment d'une part, et de l'efficacité de l'adjuvant d'autre part. [25]

Voici par ailleurs, certains des problèmes d'incompatibilité signalés entre le ciment et les adjuvants sont :

- ✓ Perte d'affaissement ;
- ✓ Faible taux de gain de résistance ;
- ✓ Raidissement précoce du béton ;

- ✓ Ségrégation du béton ;
- ✓ Augmentation de la demande en eau.

2.7.5. Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment

Le tableau I.7 résume les dosages habituels des différents adjuvants par rapport à la masse du liant.

Tableaux I.7 : *Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment*

Adjuvants	Dosage %
Plastifiants	0,15 à 1,2
Super plastifiants	0,6 à 2,5
Accélérateurs de prise	1 à 3
Accélérateurs de durcissement	0,8 à 2
Retardateurs de prise	0,2 à 0,8
Hydrofuges	0,5 à 2
Entraîneurs d'air	0,05 à 3
Rétenteurs d'eau	0,1 à 2

3. Notions de rhéologie

Dans cette partie du chapitre, nous rappelons les notions de base de la rhéologie, sans référence particulière aux matériaux cimentaires. Il s'agit de définitions de base des paramètres qui interviennent dans le comportement rhéologique d'un matériau ainsi que les modèles de comportement les plus fréquents.

La rhéologie décrit les relations entre les contraintes et les déformations d'un élément de volume, compte tenu, le cas échéant, de leurs dérivés par rapport au temps. La rhéologie est définie comme étant la science des déformations et de l'écoulement de la matière.

La caractérisation rhéologique se fait par des rhéomètres, on distingue les rhéomètres rotatifs qui sont des appareils précis et puissants donnant la signature rhéologique et peuvent être utilisés sur tous types de matériaux, depuis les liquides tels les solvants, les huiles ou les polymères, jusqu'aux matériaux durs comme le ciment. Ils permettent de mesurer les propriétés de viscosité et de cisaillement d'un matériau. Les rhéomètres peuvent être utilisés en complément des viscosimètres lors de mesures réalisées sur des fluides.

Les rhéomètres les plus répandus sont les rhéomètres rotatifs. Ils sont équipés d'un rotor permettant de mettre le produit à analyser en rotation, et d'un stator. La mesure de la vitesse de rotation permet d'en déduire la viscosité.

Généralement, les rhéomètres à cisaillement dynamique sont davantage employés pour réaliser des mesures sur des solides, comme le bitume alors que les rhéomètres capillaires sont adaptés plutôt pour les mesures sur les polymères et les plastiques [26]. La figure I.15 présente deux modèles de rhéomètres.

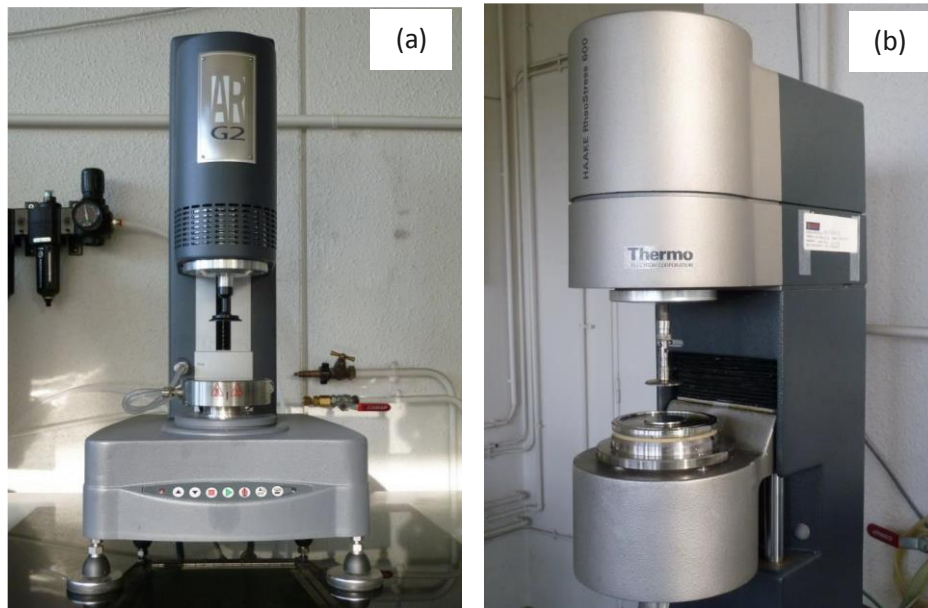


Figure I.15 : Rhéomètres : (a) AR-G2 (TA Instruments) ; (b) : RheoStress 600 (Thermo Scientific)

L'étude rhéologique permet à titre d'exemple de :

- Mesurer la viscosité en fonction du gradient de vitesse, et donc de déterminer si un matériau est newtonien ou non, et comment il se comporte en pratique (la viscosité influant grandement sur la formulation, la production ou l'application d'un produit). A titre d'exemple, la figure I.16 présente l'évolution de la viscosité en fonction du taux de cisaillement.
- Suivre l'évolution d'un matériau en fonction du temps, par exemple, suivre la cinétique de réticulation d'un polymère, de gonflement de gouttelettes d'une émulsion ou de restructuration d'un matériau (Voir Figure I.17).
- Mettre en évidence des transitions telle que la température de gélification d'un polymère, réticulation, transition de phase (Voir Figure I.18).

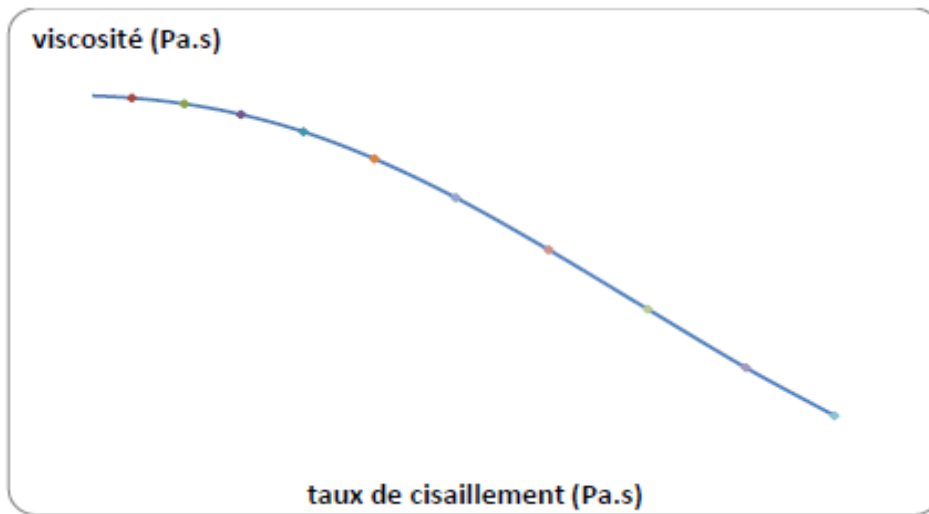


Figure I.16 : Evolution de la viscosité en fonction du taux de cisaillement d'une solution aqueuse de carraghénane à 1%.

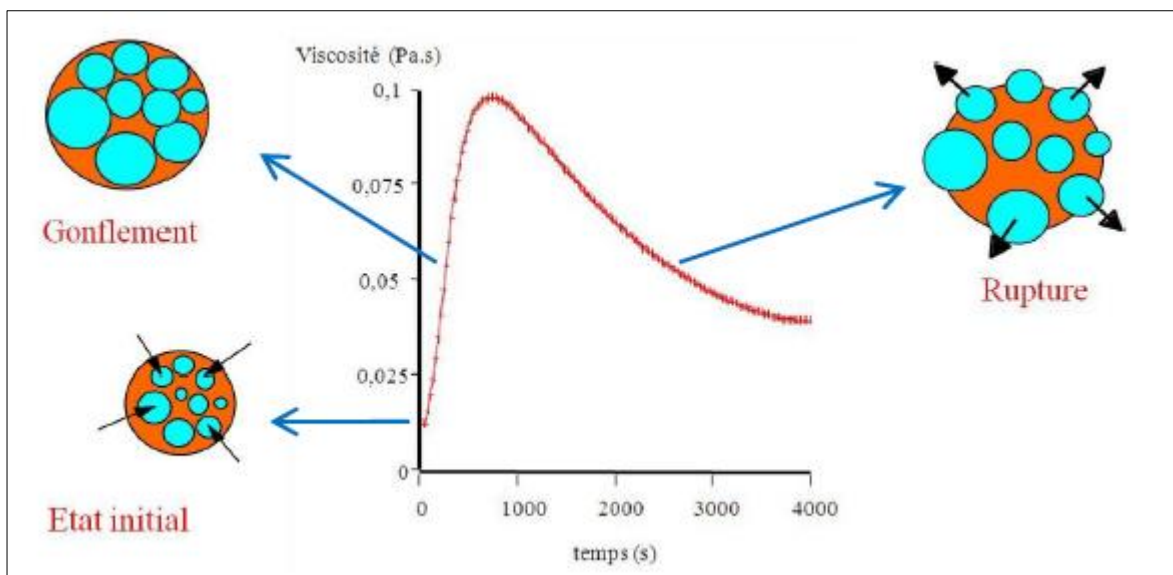


Figure I.17 : Suivi de la cinétique de gonflement/rupture d'une émulsion multiple grâce à la courbe de la viscosité de l'émulsion en fonction du temps.

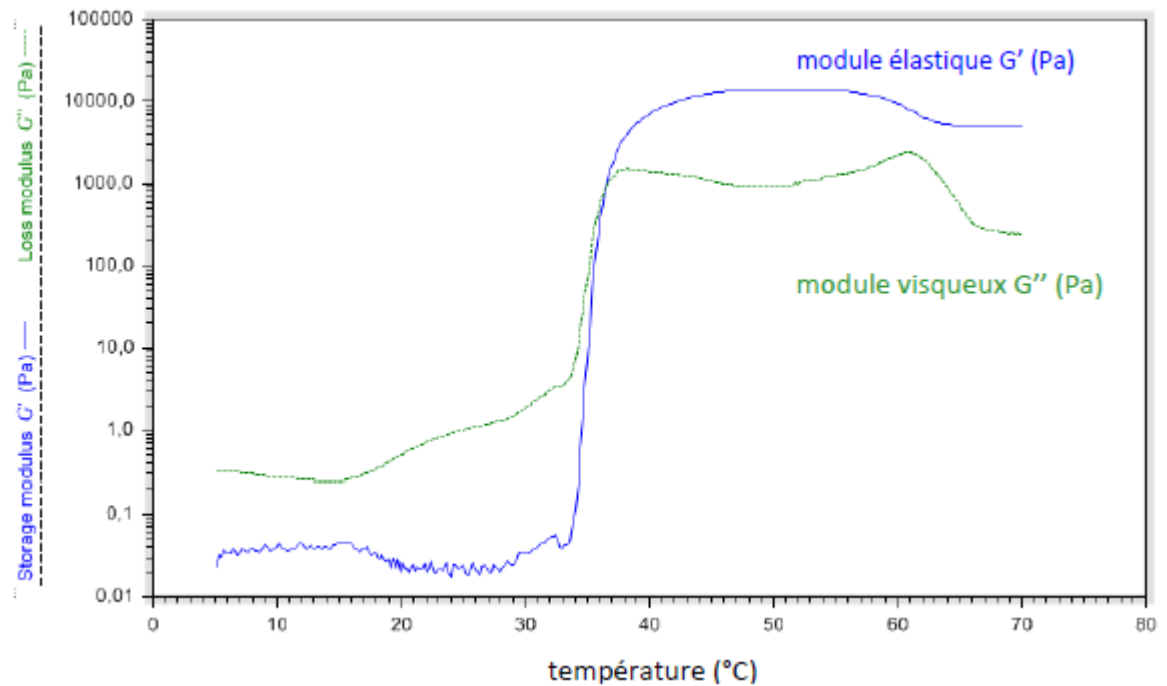


Figure I.18 : Détermination de la température de gélification à partir des modules élastique G' et visqueux G'' pour une suspension de nanoparticules lipidiques solides immergées dans un mélange de fluide simulé et de poloxamer 407.

L'étude rhéologique permet également de :

- Déterminer des contraintes critiques de fluides à seuil ;
- Déterminer le régime linéaire (gamme de contraintes où la structure du matériau est inchangée) et d'analyser les propriétés viscoélastiques d'un matériau (expériences en oscillation).

3.1. Géométrie de cisaillement

Diverses géométries de cisaillement sont disponibles : cônes-plans, plan-plan dont un strié, cylindres coaxiaux dont un double entrefer, croisillons. Un plan Peltier permet de réguler la température avec une précision de 0,01 °C, et sur une plage de 0 à 90 °C [27]. Quelques géométries courantes sont illustrées sur la figure I.19.

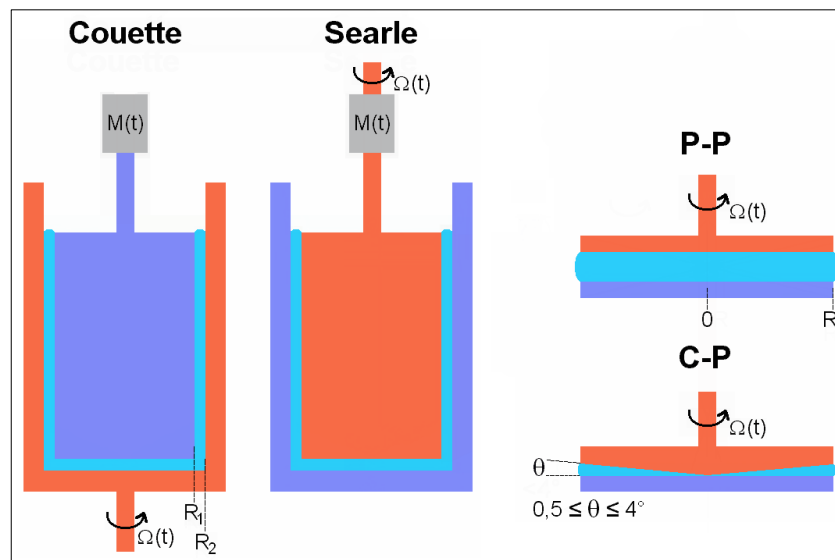


Figure I.19 : Géométries courantes de rhéomètres : cylindres coaxiaux, plateaux parallèles et cône-plan

4. Comportement rhéologique des fluides

4.1. Les fluides

Un fluide est un milieu matériel parfaitement déformable. On regroupe sous cette appellation les gaz qui sont l'exemple des fluides compressibles, et les liquides, qui sont des fluides peu compressibles. Dans certaines conditions (températures et/ou pressions), le milieu n'est ni liquide, ni gazeux, il reste fluide.

Les particules constitutives d'un fluide ne sont pas liées par des liaisons covalentes (c'est-à-dire de liaison chimique). Dans un gaz, les interactions entre particules sont négligeables, sauf lorsqu'elles se rencontrent (chocs). Dans un liquide, les molécules sont tellement proches qu'il est difficile de comprimer le fluide. Elles interagissent cette fois fortement par l'intermédiaire de forces de van der Waals, des interactions dipôlaires (les particules se comportant comme des dipôles électrostatiques). Ce type d'interactions explique les propriétés physiques et chimiques des liquides [28].

4.2. Différent types des fluides

4.2.1. Fluide newtonien

Un fluide est dit newtonien lorsque le tenseur des contraintes visqueuses est une fonction linéaire du tenseur des déformations. Le facteur de proportionnalité se nomme viscosité et celle-ci est indépendante du taux de cisaillement. Pour la plupart des fluides usuels dans des conditions standards, ce modèle est très satisfaisant. La Figure I.20 résume les différents comportements rhéologiques.

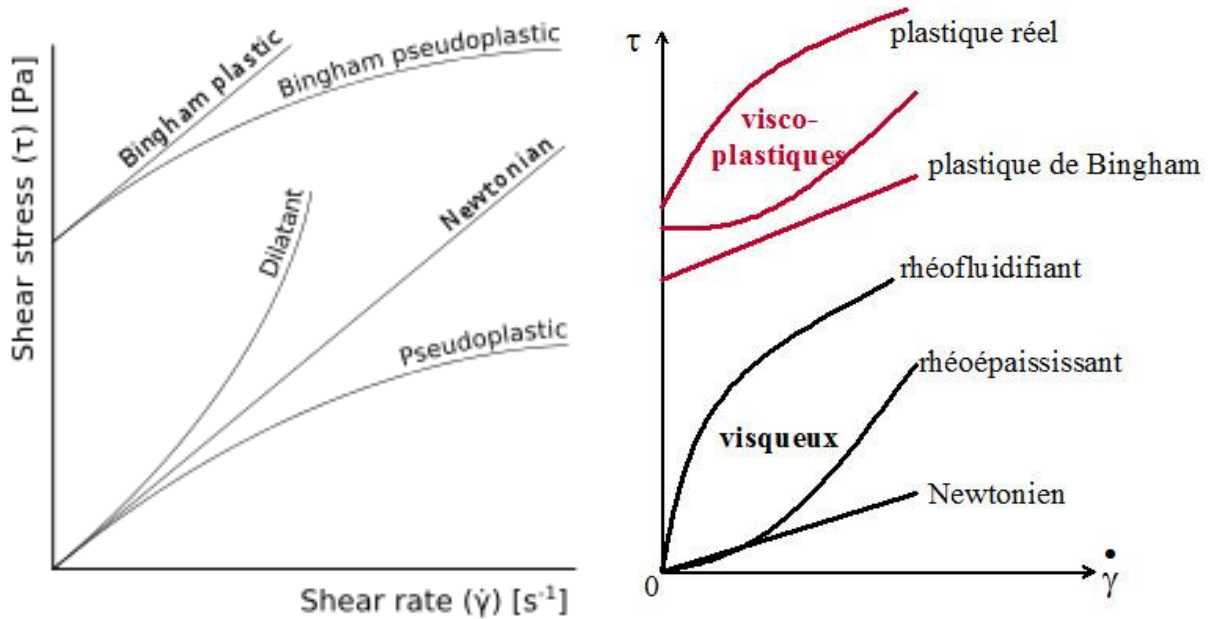


Figure I.20 : Différents comportements rhéologiques des fluides

4.2.2. Fluide non newtonien

Un fluide est dit non newtonien lorsque le tenseur des contraintes visqueuses n'est pas une fonction linéaire du tenseur des déformations. Autrement dit, lorsque sa vitesse de déformation (ou taux de cisaillement) n'est pas directement proportionnelle à la force qu'on lui applique. Le meilleur exemple est celui du sable mouillé en bord de mer : quand on frappe le sable, il a la viscosité élevée d'un solide, alors que lorsqu'on appuie doucement dessus, il se comporte comme une pâte. Un autre exemple typique est un mélange épais d'eau et de maïzena (féculé de maïs), dans lequel une main entre aisément à faible vitesse, mais ne peut rentrer à grande vitesse.

4.2.3. Fluide rhéofluidifiant

Pour ces fluides, la viscosité diminue progressivement quand on cisaille de manière plus importante. Cela donne un système de plus en plus fluide, ce qui justifie le nom de "rhéofluidifiant". Pour de faibles valeurs de contrainte σ , le liquide reste newtonien, ce qui est quasi universel.

4.2.4. Fluide à seuil

Dans ce cas particulier, l'écoulement n'a lieu qu'au-delà d'une certaine valeur de contrainte, dite contrainte seuil. Au-delà, on peut retrouver un comportement rhéofluidifiant, ou au contraire un comportement newtonien. On parlera alors de fluide de Bingham.

4.2.5. Fluide rhéoépaississant

C'est un cas plus rare, inverse au cas des rhéofluidifiants. La viscosité augmente lorsqu'on applique un cisaillement. On retrouve ce comportement pour certains polymères associatifs ou des suspensions concentrées.

4.2.6. Fluide thixotropes

Il s'agit d'un comportement particulier où l'on observe une diminution de la viscosité dans le temps pour une même contrainte après un certain délai. On peut également avoir une contrainte seuil pour ces fluides. On observe ainsi des phénomènes d'hystérèse.

4.2.7. Fluide incompressible

Un fluide est dit incompressible lorsque sa masse volumique ρ reste constante dans un écoulement. [29]

4.3. Les modèles rhéologiques

4.3.1. Le modèle fluide de la loi de puissance

Le modèle fluide de la loi de puissance est un type de modèle généralisé. Il donne une relation de base pour la viscosité ν , et la vitesse de déformation $\dot{\gamma}$. Dans ce modèle, la valeur de viscosité peut être limitée par une valeur de limite inférieure, ν_{\min} , et une valeur de limite supérieure, ν_{\max} .

La relation est donnée comme suit :

$$\nu = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

Lorsque, en unités SI :

- k est l'indice de cohérence du flux [m^2/s]
- $\dot{\gamma}$ est la vitesse de déformation par cisaillement [s^{-1}]
- n est l'indice de comportement d'écoulement.

4.3.2. Bird-Carreau Modèle

Il s'agit d'un modèle à quatre paramètres qui est valable sur toute la gamme des vitesses de cisaillement. Dans les cas où il existe des variations significatives par rapport au modèle de la loi de puissance, c'est-à-dire à des vitesses de cisaillement très élevées et très faibles, il devient essentiel d'incorporer les valeurs de viscosité à cisaillement nul, ν_0 , et à cisaillement infini, ν_∞ dans la formulation.

Pour ce modèle, la viscosité, ν , est liée à la vitesse de cisaillement, $\dot{\gamma}$, par l'équation suivante :

$$\nu = \nu_\infty + (\nu_0 - \nu_\infty) \times [1 + (k \cdot \dot{\gamma})^a]^{(n-1)/a}$$

Où :

- a a une valeur par défaut de 2. Elle correspond au passage du comportement linéaire à la loi de puissance ;
- ν_0 est la viscosité à vitesse de cisaillement nulle ;
- ν_∞ est la viscosité à une vitesse de cisaillement infinie ;
- k est le temps de relaxation en secondes ;
- n est l'indice de puissance.

4.3.3. Modèle de loi inter-puissances

Le modèle de loi inter-Puissances est également un modèle à quatre paramètres qui couvre toute la plage de vitesse de cisaillement.

La formulation du modèle est donnée comme suit :

$$\nu = \nu_\infty + (\nu_0 - \nu_\infty) / [1 + (m \cdot \dot{\gamma})^n]$$

Où :

- ν_0 est la viscosité à vitesse de cisaillement nulle ;
- ν_∞ est la viscosité à vitesse de cisaillement infinie ;
- $\dot{\gamma}$ est la vitesse de déformation par cisaillement [s^{-1}].
- n est l'indice de débit.
- m est le temps naturel en secondes auquel le comportement linéaire passe à une loi de puissance.

4.3.4. Herschel-Bulkley Modèle

Le modèle de Herschel-Bulkley est également un modèle généralisé et non linéaire de fluides non newtoniens. Ce modèle combine le comportement de Bingham et les fluides de la loi de puissance dans une seule relation. Pour des vitesses de déformation très faibles, le matériau se comporte comme un fluide très visqueux avec une viscosité ν_0 . Après une valeur minimale de vitesse de déformation correspondant à une contrainte seuil τ_0 , la viscosité est représentée par la relation puissance-loi [30].

La formulation du modèle est donnée comme suit :

$$\nu = \min (\nu_0, \tau_0/\dot{\gamma} + k \cdot \dot{\gamma}^{n-1})$$

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$$

Où, en unités SI :

- τ est la contrainte de cisaillement [Pa].
- τ_0 est la limite d'élasticité [Pa].
- k est l'indice de cohérence [m^2/s].
- n est l'indice de flux.
- ν_0 est la viscosité à vitesse de cisaillement nulle.

Chapitre II
Matériels et méthodes
expérimentales

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux utilisés ainsi que les différentes méthodes expérimentales suivies pour la réalisation de cette étude. Les techniques de caractérisation employées ont été également détaillées.

2. Les matériaux utilisés

Différents matériaux ont été utilisés dans cette investigation expérimentale à savoir 3 types de ciments locaux (CPA, CPJ et CRS), deux types d'adjuvants ainsi que les constituants courants pour la formulation du béton à savoir les granulats et l'eau potable.

2.1. Les ciments

Trois types de ciments ont été utilisés dans cette étude expérimentale à savoir :

- Ciment Portland artificiel CPA CEM I 42.5 R provenant de la cimenterie de Biskra ;
- Ciment aux ajouts CPJ CEM II 42.5 R, récupéré de la cimenterie de MEFTAH ;
- Un ciment résistant aux sulfates CRS de classe 42.5 R fabriqué par la cimenterie de Ain Kbir, Sétif.

2.1.1. Caractérisation des liants

Afin de connaître les caractéristiques essentielles des trois ciments utilisés, différentes techniques de caractérisation ont été appliquées.

2.1.1.1. Surface spécifique de Blaine

La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou la surface totale développée de tous les grains contenus dans un gramme de ciment. Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm^2/g .

Cet essai consiste à calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre, la surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue, il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment.

Cet essai est réalisé à l'aide de l'appareil appelé Toni technique (Voir Figure II.1). Le mode opératoire de l'essai est détaillé dans la partie annexe. Cet essai est effectué selon la norme NF EN 196-6



Figure II.1 : Appareil SSB Toni technique

2.1.1.2. Fluorescence des rayons X

La fluorescence X (XRF) est une technique d'analyse qui peut être utilisée pour déterminer la composition chimique d'une grande variété de types d'échantillons, y compris les solides, les liquides, les boues et les poudres libres. La fluorescence X est également utilisée pour déterminer l'épaisseur et la composition des couches et des revêtements. Elle peut analyser des éléments allant du béryllium (Be) à l'uranium (U) dans des gammes de concentrations allant de 100 wt% à des niveaux inférieurs à la ppm.

La fluorescence X est une méthode d'émission atomique, similaire à la spectroscopie d'émission optique (OES), à la spectrométrie d'émission plasma (ICP) et à l'analyse par activation neutronique (spectroscopie gamma). Ces méthodes mesurent la longueur d'onde et l'intensité de la « lumière » (les rayons X dans ce cas) émise par les atomes énergisés de l'échantillon. En fluorescence X, l'irradiation par un faisceau de rayons X primaire depuis un tube à rayons X provoque l'émission de rayons X fluorescents dotés d'énergies discrètes caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon.

Cette technique permet d'avoir les pourcentages massiques en oxydes constituant le matériau. Dans notre cas pratique, nous avons utilisé l'appareil Malvern PANalytical ZETIUM montré sur la figure II.2.

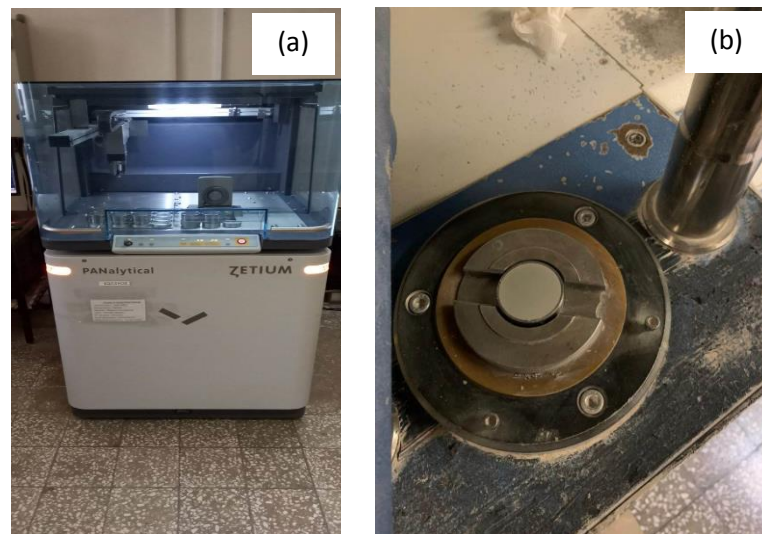


Figure II.2 : (a) Appareil de fluorescence X PANalytical (b) pastilleuse

2.1.1.3. La consistance normale

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. En générale, on utilise l'essai de consistance effectué avec l'appareil de *Vicat* conformément à l'essai à la Norme 196-3.

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique, qui évolue au cours de temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite « consistance normalisée ».

La consistance est déterminée en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « consistance *Vicat* ».

L'appareil Vicat (Voir Figure II.3) est formé d'un petit moule tronconique et d'une tige coulissante munie à son extrémité d'une aiguille de Vicat ou d'une sonde de consistance de diamètre 10 mm, permet de caractériser la consistance de la pâte de ciment que l'on met dans le moule et de repérer le début de prise de cette pâte.

Un mélangeur de laboratoire programmable, normalisé pour le malaxage de pâtes de ciment et mortiers de consistance plastique est également nécessaire pour la réalisation de l'essai.

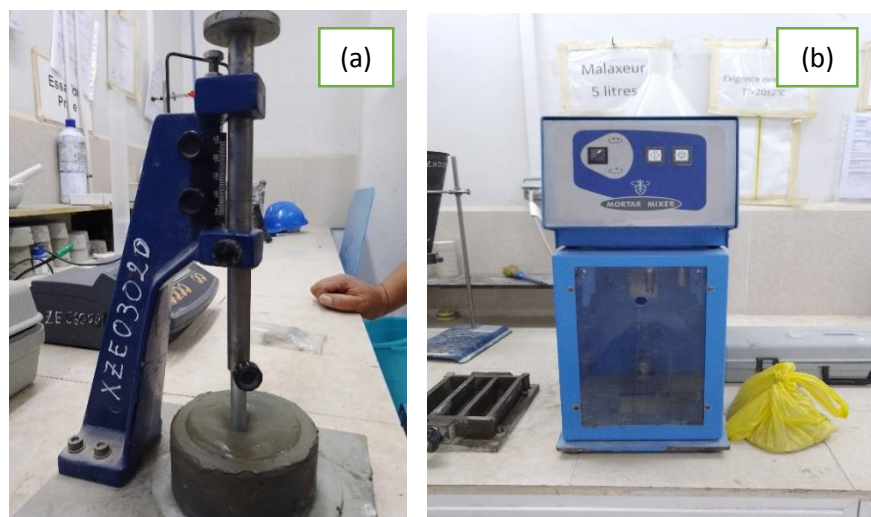


Figure II.3 : (a) Appareil de Vicat (b) malaxeur

Le tableau II.1 présente les quantités utilisées pour l'essai de consistance.

Tableau II.1 : Quantités des produits utilisés

Type de ciment	Masse du ciment (g)	Masse d'eau (g)	Ratio E/C
CPA	500	130	0.26
CPJ	500	126	0.25
CRS	500	126	0.25

2.1.1.4. Les délais de prise

La présence de régulateur de prise dans la masse des liants hydrauliques offre à ces derniers, après gâchage, une prise qui commence après quelques heures. Il est donc nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et du béton dont ils sont confectionnés.

Autrement dit, Il est nécessaire de connaître les début et fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

2.1.1.4.1. Début et fin de prise

L'essai doit se faire dans une salle ou une armoire humide maintenue à $(20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$ et à au moins 90% d'humidité relative. La figure II.4 met en évidence le début de prise d'une pâte de ciment.

L'essai de fin de prise se fait sur la face de l'éprouvette primitivement en contact avec la plaque de base.



Figure II.4 : *Mise en évidence du début de prise d'une pâte de ciment*

2.2. Les d'adjuvants

Dans la présente étude, deux types d'adjuvants sous forme liquide récupérés de la société BASF ont été utilisés à savoir :

- MasterGlenium sky 841 : Superplastifiant haut-réducteur d'eau ;
- MasterPozzolith N 399 : Plastifiant réducteur d'eau.

2.2.1. Caractérisation physicochimiques des adjuvants et coulis

2.2.1.1. Le potentiel hydrogène pH

Le potentiel hydrogène, noté pH, permet de mesurer l'acidité ou la basicité d'une solution. Il est lié à la concentration en ions oxonium H_3O^+ dans la solution.

La Mesure de la valeur du pH a été effectuée en utilisant un pH-mètre qui est un appareil de mesure constitué d'une électrode double reliée à un boîtier électronique indiquant la valeur du pH.



Figure II.5 : *pH-mètre*

L'étalonnage du pH-mètre est préalablement fait de la manière suivante :

- Sortir la sonde de l'eau distillée et l'essuyer délicatement avec du papier Joseph.
- Plonger la sonde dans une solution tampon de pH = 7. Régler le bouton de température pour que le pH-mètre affiche la valeur 7.
- Sortir la sonde de la solution tampon, la rincer avec de l'eau distillée et l'essuyer délicatement avec du papier Joseph.
- Plonger la sonde dans une solution tampon de pH = 4 (ou 11 pour faire des mesures en milieu basique). Régler le bouton d'étalonnage pour que le pH-mètre affiche 4.
- Sortir la sonde de la solution tampon, la rincer avec de l'eau distillée et l'essuyer délicatement avec du papier Joseph.
- Eventuellement, répéter ces deux opérations pour un étalonnage plus précis.
- Plonger la sonde dans l'eau distillée en attendant de faire les mesures.

La Mesure

- Sortir la sonde de l'eau distillée.
- La rincer (avec de l'eau distillée, ou mieux, avec la solution dont on veut mesurer le pH) et l'essuyer délicatement.
- Plonger la sonde dans la solution dont on veut mesurer le pH. Attendre la stabilité (quelques secondes). Lire la valeur du pH.
- Sortir la sonde de la solution, la rincer et la plonger dans l'eau distillée en attendant la prochaine mesure.

2.2.1.2. L'extrait sec par étuvage

L'extrait sec d'un produit est la teneur en matière sèche après évaporation de toutes les substances volatiles. Le principe de l'essai consiste à évaporer les matières volatiles par étuvage à une température, pendant un temps déterminé.



Figure II.6 : (a) Etuve de séchage (b) balance analytique

Le Mode opératoire de l'essai consiste à :

- Chauffer la coupelle d'évaporation pendant 4h dans une étuve à 105 ± 3 °C
- Peser la coupelle sèche vide (MC)
- Peser exactement 10g d'échantillons (ME).
- Entreposer dans l'étuve les échantillons à température de 105 °C à 4h.
- Après le séchage, on refroidit les échantillons et on pèse les échantillons (MCR).

Le Calcul de l'extrait sec se fait selon la formule suivante :

$$\text{Extrait sec} = \frac{MCR - MC}{ME} 100\%$$

Où :

MC est la masse de la coupelle (en g) ;

ME est la masse d'échantillon (en g) ;

MCR est la masse de la coupelle + le résidu (en g).

2.2.1.3. Densité des adjuvants

Comme illustrée sur la Figure II.6, la mesure de la densité des deux adjuvants a été réalisée à l'aide d'un densimètre introduit d'une éprouvette cylindrique contenant 250 ml d'adjuvant. Une lecture directe est faite sur l'appareil.

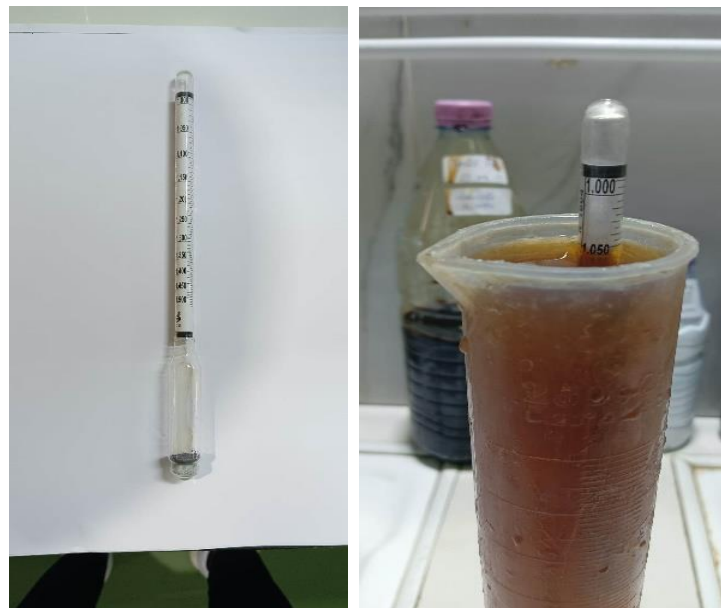


Figure II.7 : Mise en évidence de l'essai de densité

2.2.1.4. Etude rhéologique

Afin de mettre en évidence l'influence des adjuvants sur le comportement rhéologique des pâtes cimentaires, une étude rhéologique a été menée par deux méthodes :

A/ Méthode du Cône de Marsh

Pour étudier le comportement rhéologique d'un ciment en présence d'adjuvant, on utilise la méthode du coulis qui consiste à mesurer la perte de fluidité dans le temps d'un coulis de ciment. Le cône de Marsh est utilisé depuis longtemps par l'industrie pétrolière pour mesurer la fluidité des coulis de

Ciment ou de bentonite. C'est pourquoi cette technique est adoptée pour la mesure de la fluidité et l'étude des propriétés rhéologiques des coulis de ciment. L'essai consiste à mesurer le temps qu'il faut pour remplir le pot normalisé jusqu'à 1 litre de coulis à travers un orifice d'évacuation de 5 mm de diamètre de cône comme indiqué sur la figure II.7.



Figure II.8 : Fluidité des pâtes cimentaires à l'aide du cône de Marsh

Le Mode opératoire de cet essai se résume ainsi :

- Premièrement, le rapport massique E/C est fixé à 0.4
- Peser 2000g du ciment et 800g d'eau (coulis témoin), pour les coulis adjuvantées, on ajoute les quantités d'adjuvants en variant le pourcentage.
- Verser le coulis dans le cône de Marsh ;
- A l'aide d'un chronomètre, on mesure le temps qu'il prend pour remplir 1 litre.



Figure II.9 : Mise en œuvre de coulis adjuvantée

2.2.1.5. Mesure de la densité des coulis

La densité de coulis est mesurée à l'aide d'un densimètre (voir Figure II.13). L'essai consiste en premier lieu à étalonner le densimètre par l'eau avant de placer le coulis dans le densimètre en le mettant à sa place désignée. La valeur de la densité est lue directement sur l'appareil.



Figure II.10 : Densimètre

3. Rhéométrie

Afin d'étudier l'influence des adjuvants sur le comportement rhéologique des pâtes cimentaires selon le type de ciment, une étude rhéométrique a été réalisée à l'université de Tizi-Ouzou. L'objectif principal est de mettre en évidence l'impact de la concentration de nos adjuvants sur la fluidité des mélanges et déduire ainsi les dosages à saturation de chaque superplastifiant. Pour cela, un rhéomètre de type HAKE Rheostress 1 a été utilisé.

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

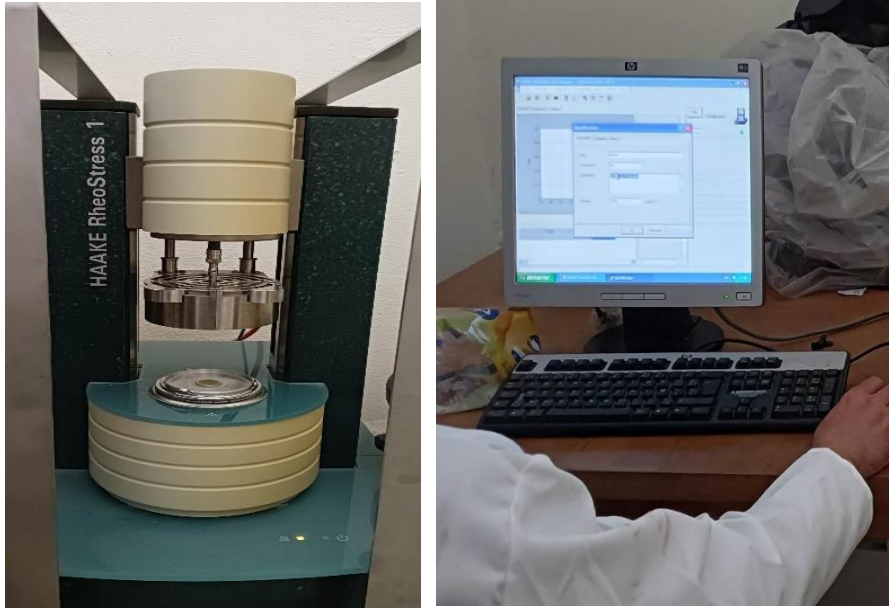


Figure II.11 : *rhéomètre HAAKE Rheostress piloté par PC*

Trois types de ciments et deux adjuvants ont été utilisés pour les essais rhéologiques, pour cela, on a procédé en premier lieu à fixer le ratio massique E/C à 0.4. Une quantité de 100 g de chaque ciment est mélangé au préalable avec 40g d'eau. De faibles dosages d'adjuvants calculés par rapport à la masse du ciment sont introduits au fur et à mesure au mélange.

Outre la viscosité, l'évolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du gradient de vitesse $\dot{\gamma}$ est suivie. Des rhéogrammes sont obtenus pour chaque type de ciment et en fonction de la concentration de l'adjuvant.

A préciser enfin que tous les essais rhéologiques ont été réalisés à température ambiante. Une géométrie plan-plan a été employée.



Figure II.12 : *Placement de l'échantillon dans le rhéomètre*

4. Les granulats

Dans l'optique de formulation du béton, les granulats suivants ont été caractérisés :

- Sable concassé de dimensions (0/3) -Bouzegza-
- Sable fin de dimensions (0/1) -Boussaâda-
- Gravier 3/8 -Bouzegza-
- Gravier 8/15 -Bouzegza-

4.1. Analyse granulométrique

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Ce classement permet de nommer, selon les deux limites des dimensions des grains, le matériau analysé. Le matériau est placé dans le tamis supérieur et le classement des grains s'obtient par vibration de l'ensemble de la colonne des tamis. Cette vibration peut être mécanique ou manuelle. L'analyse granulométrique permet ainsi de connaître les différentes classes granulaires en fractionnant les matériaux à l'aide des tamis.

Quelques définitions et précisions techniques sont nécessaires à la réalisation de cet essai :

Tamisage : Opération qui consiste à séparer les granulats en différentes fractions au moyen d'une série de tamis de caractéristiques connues.

Le tamisât : c'est l'ensemble des matériaux qui passent à travers le tamis

Le refus : c'est l'ensemble des matériaux qui restent sur le tamis

Le refus ou le tamisât : s'expriment en pourcentage du poids total de l'échantillon analysé

L'analyse granulométrique des granulats est réalisée selon les étapes suivantes :

- Préparation de l'échantillon qui sera analysé. Le choix du matériau imposera aussi le choix des tamis. L'échantillon choisi devra être sec. Sa teneur en eau pourra être vérifiée avec l'essai correspondant de mesure de teneur en eau.
- Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant en mettant le tamis avec la plus grosse maille en haut et le tamis avec la plus petite maille en bas, en finissant avec le fond de tamis et le couvercle de la colonne.
- Verser le matériau sec dans le tamis.
- Fermer le couvercle de la colonne de tamis
- Secouer manuellement ou mécaniquement la colonne de tamis
- Reprendre un à un les tamis en ajoutant le fond et le couvercle le tamisât intégrant le tamis suivant et le refus restant dans le tamis initial.
- Déterminer à l'aide de la balance électronique la masse de chaque refus
- Réaliser cette opération sur tous les refus y compris le matériau dans le fond de la colonne de tamis
- Remplir le tableau correspondant avec les résultats des masses obtenues et calculer les pourcentages de refus et tamisât pour chaque tamis.
- Tracer sur la feuille de graphique vierge la courbe de granulométrie à l'aide des résultats obtenus.

5. Equivalent de sable

L'équivalent de sable est un indicateur, utilisé en géotechnique, caractérisant la propreté d'un sable ou d'un gravier. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur. On parle d'essai d'équivalent de sable piston » ou, plus simplement, d'essai d'équivalent de sable ».

L'essai d'équivalent de sable utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons et les sols, mais son importance est moindre, le paramètre le plus significatif étant la valeur de bleu du sol. La figure II.14 illustre le principe de cet essai.



Figure II.13 : Principe de l'essai d'équivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable suit les étapes suivantes :

- La solution lavante est placée dans la bonbonne de cinq litres situés à un mètre au-dessus du fond des éprouvettes, le dispositif siphonique est amorcé et il est relié au tube laveur.
- Pour l'étude, on utilisera deux éprouvettes propres et on fera la moyenne des deux résultats.
- Remplir les éprouvettes graduées d'eau.
- Verser la quantité de sable (environ 120 g), et laisser reposer pendant 10 minutes.
- Boucher les éprouvettes et les faire agiter 90 fois aller et retour dans le sens horizontal puis remplacer verticalement.
- Laver le sable avec une solution lavant, et laisser reposer l'ensemble pendant 20 mm.
- Mesurer la hauteur du sable propre (H2) et la hauteur du sable propre + éléments fins (H1).
- La mesure de(H2), n'est pas toujours aisée, ce qui conduit à faire la mesure la plus précise : [ES].
- Descendre lentement le piston dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, l'immobiliser, mesurer (H2).

6. Préparation des mortiers

Afin de déterminer la classe vraie des ciments utilisés dans notre campagne expérimentale, des mortiers normalisés ont été confectionnés en utilisant un sable normalisé (Figure II.15). Des éprouvettes de dimensions 4x4x16 cm³ ont été élaborées.



Figure II.14 : (a) Sable normalisé (b) moules pour mortier

Pour la confection des éprouvettes de mortier, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Peser 450g de ciment CEM I.
- Peser 225g d'eau.
- Mettre les deux dans le malaxeur et le mettre en marche pendant 90s à une vitesse lente
- Arrêter le malaxeur pendant 15s pour gâter avec une spatule toute la pâte
- Ajouter le sable normalisé
- Remettre le malaxeur en marche pendant 90s
- Verser le mélange dans le moule de façon à remplir que la moitié de moule
- Pour éliminer toutes les bulles d'air, mettre la table à choc en marche pendant 60s
- Compléter le remplissage de moule et de nouveau remettre la table à choc en marche encore 60s
- Comme une dernière étape, on met des étiquettes sur les éprouvettes de mortier.

6.1. Caractérisation mécanique du mortier

Après tirage du mortier on le démoule et on met les trois éprouvettes dans l'eau. L'écrasement des éprouvettes s'effectue à différentes échéances à savoir 2, 7 et 28 jours.



Figure II.15 : Machine hydraulique d'écrasement MATEST

7. Formulation du béton

Afin de tester les deux adjuvants étudiés à l'échelle supérieure, et de voir leur impact sur les propriétés mécaniques, des mélanges de béton ont été élaborés. Le ciment CEM I a été choisi comme liant. Un béton témoin sans adjuvant a été également conçu.

La méthode de DREUX-GORISSE a été employée pour la formulation du béton. L'objectif de cette méthode est de déterminer en fonction de la maniabilité et la résistance définie par le cahier des charges, la quantité des matériaux nécessaire à la confection d'un mètre cube de béton (eau + sable + graviers + ciment).

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton entre autres :

- Détermination du rapport C/E ;
- Détermination de C et E ;
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides ;
- Détermination de la compacité du béton ;
- Détermination des masses de granulats.

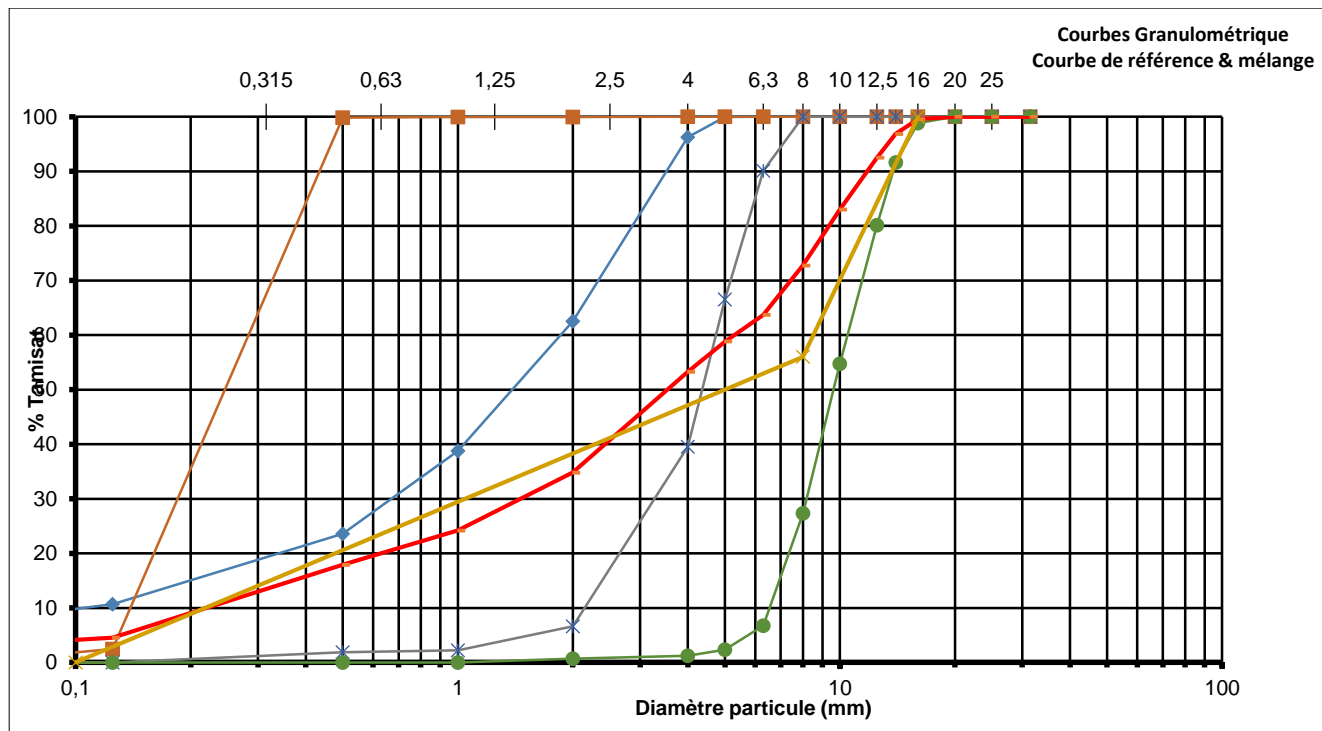


Figure II.16 : Courbes granulométriques des différents constituants

Les quantités de chaque constituant sont données dans le tableau II.2

Tableau II.2. Les quantités de chaque constituant

Désignation	Quantité (Kg/m ³)	Quantité utilisée (Kg)
Sable 0/3	773	27.05
Sable 0/1	150	5.24
Gravier 3/8	253	8.84
Gravier 8/15	702	24.56
Gravier 15/25	0	0.00
Ciment CEM I	350	12.25
Eau	163	5.6977

7.1. Préparation des mélanges et confection des éprouvettes

Après avoir pesé la quantité nécessaire de chaque constituant (Figure II.29), nous les mettons dans le malaxeur sans eau préalablement allumé afin de les bien mélanger. Le malaxage des mélanges du béton a été effectué à l'aide d'un malaxeur fixe. Il est constitué d'une cuve équipée de palettes tournant sur un axe. Son utilisation permet une meilleure homogénéité du mélange.

Ensuite ajoutée de l'eau (toute la quantité pour le béton témoin), alors que pour le béton adjuvanté, on ajoute une petite quantité, juste pour l'hydratation du ciment, ensuite on ajoute l'adjuvant et on continue la quantité d'eau restante. Après avoir contrôlé l'ouvrabilité à l'aide du cône d'Abrams, on remplit les cuves de dimensions $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$.



Figure II.17 : *Différents constituants du béton*

7.2. Critère d'ouvrabilité du béton

La fluidité des mélanges du béton a été évaluée à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abram. Il s'agit d'un essai simple qui permet de mesurer et contrôler la fluidité du béton frais. Il permet de déterminer l'ouvrabilité d'un béton. Celle-ci se caractérise par une valeur appelée « consistance ». Dans notre cas pratique, l'affaissement A_c a été fixé à 16 cm.

Le cône d'Abram s'emploie en laboratoire ou sur chantier. Comme illustré dans la Figure II.31, le test est réalisé selon les étapes suivantes :

- Positionner le cône ;
- Remplissage du cône avec du béton ; le remplissage du cône s'effectue en trois fois. Pour chaque couche, on vibre le béton avec la tige de piquetage (25 coups par couche) ;
- Araser pour enlever l'excédent de béton ;
- Soulever le cône verticalement ;
- Enfin, mesurer à l'aide mètre-ruban l'affaissement en (cm).



Figure II.18 : Principe de l'essai au cône d'Abrams

Après 24H, les éprouvettes ont été démoulées et stockées dans l'eau jusqu'à l'échéance d'écrasement



Figure II.19 : Préparation et stockage des éprouvettes

8. Caractérisation du béton

8.1. Mesure de densité de béton frais

Après le remplissage des moules, on a procédé à la pesée des éprouvettes, on détermine la densité φ du béton frais à l'aide de la formule suivante :

$$\varphi = \frac{M}{V}$$

Où :

M : Masse des éprouvettes en (g) ;

V : Volume occupé des éprouvettes en (cm³).



Figure II.20 : Pesée de l'éprouvette du béton frais

8.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression des échantillons a été réalisée à l'âge de 7 ; 14 et 28 jours de durcissement conformément à la norme NF EN 206/CN et ce en utilisant une machine hydraulique.



Figure II.21 : (a) éprouvettes normalisées (b) machine d'écrasement

Chapitre III
Résultats
et discussions

Ce chapitre est exclusivement dédié à la présentation des résultats obtenus ainsi que leurs analyses et interprétations.

1. Caractérisation des ciments

1.1. Surface spécifique

Les résultats des surfaces spécifiques des trois types de ciments employés sont présentés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Surface spécifique et densité des trois ciments utilisés

Type du ciment	Masse (g)	Densité (g/cm ³)	Surface spécifique (cm ² /g)
CPJ	2.688	3.09	5160
CRS	2.784	3.20	3330
CPA	2.767	3.18	3540

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la densité des trois types de ciments est presque identique. En revanche, la surface spécifique du ciment aux ajouts (CPJ) est nettement supérieure à celle des deux autres ciments, cette valeur considérée élevée par rapport à la norme en vigueur est due au broyage poussé du clinker et des ajouts utilisés.

1.2. Composition chimique et minéralogique

La composition chimique en oxydes des ciments réalisée à l'aide de la fluorescence des rayons X est affichée dans le tableau III.2

Tableau III.2 : Compositions chimiques des ciments

Type du ciment	CPA	CPJ	CRS
Composé	Teneur (%)	Teneur (%)	Teneur (%)
SiO ₂	20.149	18.84	21.08
Al ₂ O ₃	4.288	4.60	3.50
Fe ₂ O ₃	3.468	3.00	4.27
MgO	1.954	1.25	2.03
CaO	62.946	61.49	63.19
Na ₂ O	0.329	0.14	0.08
K ₂ O	0.657	0.62	0.45
SO ₃	2.474	2.15	2.00
Cl	0.001	0.013	0.021
CaO Libre	1.402	0.511	0.756
Insolubles	0.35	2.19	1.29
P.F	2.650	7.520	3.030

Les résultats sont assez similaires pour les trois types de ciments surtout concernant les composants dits essentiels. On peut distinguer que le CPJ possède une perte au feu assez élevée alors que le CPA contient un taux de chaux libre assez important tout en restant dans l'intervalle des normes standard exigées.

La composition minéralogique des ciments est donnée dans le tableau III.3

Tableau III.3 : Composition minéralogique des ciments.

Phase	Minéral	Teneur rapportée au clinker (%). -CPA-	Teneur rapportée au clinker (%). -CPJ-	Teneur rapportée au clinker (%). -CRS-
Clinker	C ₃ S	57	55	56
	C ₂ S	21	23	22
	C ₃ A	07	07	03
	C ₄ AF	12	12	16
	CaO _L	0.2	0.1	0.1
Régulateur de prise	Gypse	04	04	04
Ajout (%)	Calcaire	05	12	04

Le tableau III.3 représente les pourcentages massiques des différents minéraux des trois ciments, ces résultats permettent de comprendre et de pouvoir interpréter certains comportements des ciments.

Le C₃S et le C₂S sont responsables respectivement de la résistance à courts et long terme sont presque identique dans tous les ciments analysés, cela a du sens parce que les trois ciments sont de même classe de résistance.

On remarque aussi un pourcentage réduit en aluminates tricalcique (C₃A) dans le ciment résistant aux sulfates (CRS), ce taux faible (3%) par rapport aux deux autres ciments, confère à ce type de ciment cette caractéristique de résister aux attaques sulfatiques.

1.3. La consistance

Le tableau III.4 représente les résultats des essais de la consistance des trois ciments effectués à température ambiante, les essais ont été réalisés avec des masses identiques de ciments de 500 g, la quantité d'eau versée influence le rapport E/C.

Tableau III.4 : Résultats des essais de consistance

Type de ciment	Essai	Température (°C)	Poids du ciment (g)	Masse d'eau (g)	E/C	Consistance (mm)
CPA	1	20	500	130	0.26	7
CPJ	1	22	500	130	0.26	0
	2	22	500	126	0.25	6
CRS	1	20	500	130	0.26	0
	2	22	500	126	0.25	7

Le ciment CPA marque une consistance normale de 7 mm dans le premier essai avec une quantité d'eau de 130g ce qui correspond à un ratio E/C = 0.26.

Le ciment CPJ marque une consistance de 6 mm avec une quantité d'eau de 126g. Le rapport E/C = 0.25.

Enfin, le ciment CRS a marqué une consistance de 7 mm lorsqu'une quantité d'eau de 126 g a été ajoutée, ce qui correspond à un ratio E/C = 0.25

1.4. Délais de prise

1.4.1 Début et fin de prise

Le tableau III.5 illustre les résultats de début et fin de prise de trois ciments,

Tableau III.5 : Résultats des essais des délais de prise

Type de ciment	CPA	CPJ	CRS
Début de prise (min)	2h :00	2h :15	2h :00
Fin de prise (min)	6h :15	4h :00	5h :00
Distance (mm)	3	3	4

Nous remarquons que le ciment composé CPJ possède une fin de prise plus rapide que les deux autres ciments, atteinte après juste quatre heures de temps. Par contre, la fin de prise du ciment Portland artificiel est nettement prolongée.

Ces propriétés variées entre les trois ciments peuvent s'expliquer par leurs compositions en constituants variable, à titre d'exemple le CPJ contient au moins entre 6 à 20 % d'ajouts cimentaires, ce qui peut influencer les délais de prise.

2. Caractérisation des adjuvants

2.1. Mesure du pH

Le tableau III.6 représente les résultats de mesure de pH des deux adjuvants utilisés.

Tableau III.6 : Mesure de pH

Adjuvants	Valeur du pH
<i>MasterGlenium sky 841</i>	5.69
<i>MasterPozzolith N 399</i>	7.97

Le plastifiant *MasterPozzolith N 399* possède un pH légèrement basique avec une valeur de 7.97 tandis que le superplastifiant *MasterGlenium sky 841* a un pH plutôt acide avec une valeur de 5.69 ce qui peut influencer les propriétés des matériaux élaborés.

2.2. Extrait sec

Le tableau III.7 représente les résultats de l'essai de l'extrait sec des deux adjuvants.

Tableau III.7 : Résultats de l'essai d'extrait sec

Adjuvants	Extrait sec (%)	Valeur Moyenne (%)
<i>MasterGlenium sky 841</i>	18.84	18.965
	19.01	
<i>MasterPozzolith N 399</i>	20.54	20.495
	20.45	

La détermination de l'extrait sec d'un adjuvant présenté en solution aqueuse est caractéristique de sa teneur en matières actives, les résultats des essais montre que le plastifiant *Masterpozzolith N 399* a un extrait sec légèrement supérieur par rapport au superplastifiant.

2.3. La densité

Le tableau III.8 présente les résultats de la mesure de la densité des deux adjuvants, les densités des deux adjuvants sont presque identiques.

Tableau III.8 : Résultats de mesure de la densité des adjuvants

Adjuvant	Densité
<i>MasterGlenium sky 841</i>	1.045
<i>MasterPozzoloth N 399</i>	1.075

3. Temps d'écoulement des coulis

Afin de mettre en évidence le comportement rhéologique des coulis élaborés à base de chaque type de ciment, la méthode de cône de Marsh a été utilisée.

Les tableaux III.9, III.10 et III.11 et les figures III.1, III.2, III.3 montrent respectivement les résultats que nous avons obtenu de l'effet du type d'adjuvants ainsi que leurs teneurs sur le comportement rhéologique des coulis conçus à base de chaque type de ciment.

A noter que le temps d'écoulement des coulis est mesuré en minute et ce, en fonction de la variation du pourcentage d'adjuvant introduit.

Tableaux III.9 : Temps d'écoulement des coulis à base du CPA

Teneur adjuvant (%)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6
<i>Temps [min] MasterGlenium (MG)</i>	10	2.34	1.39	1.32	1.27	1.28	1.28	1.37	/
<i>Temps [min] MasterPozzoloth (MP)</i>	10	5	4.1	3.2	2.42	2.37	2.35	2.35	2.45

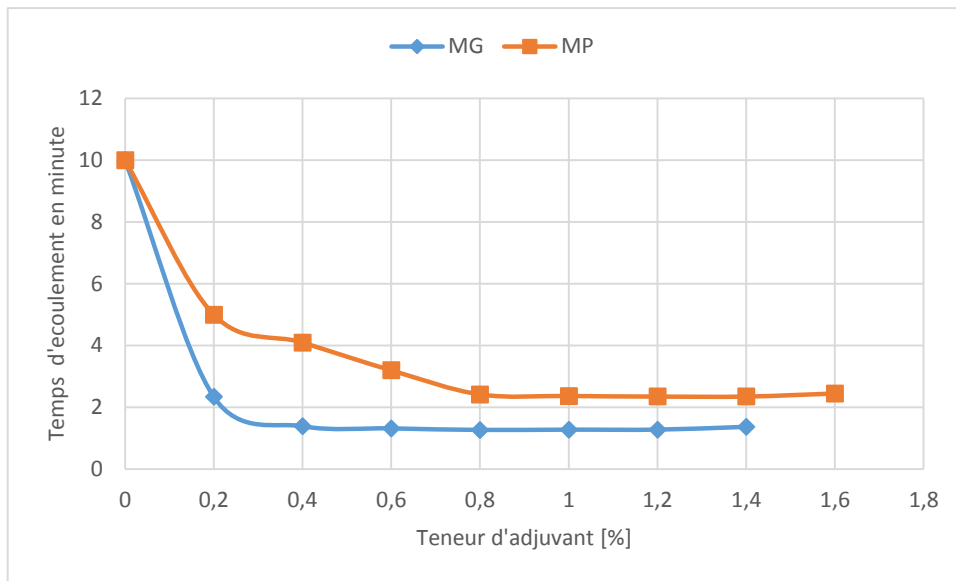


Figure III.1 : Evolution du temps d'écoulement des coulis à base de CPA en fonction du type d'adjuvant et de sa teneur

Tableaux III.10 : Temps d'écoulement des coulis à base du CPJ

Teneur adjuvant (%)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
Temps [min] MasterGlenium (MG)	7	1.46	1.28	1.16	1.12	1.17	1.17	1.21	/	/	/
Temps [min] MasterPozzolith (MP)	7	5.14	4.32	3.32	2.2	1.55	1.45	1.42	1.28	1.28	1.28

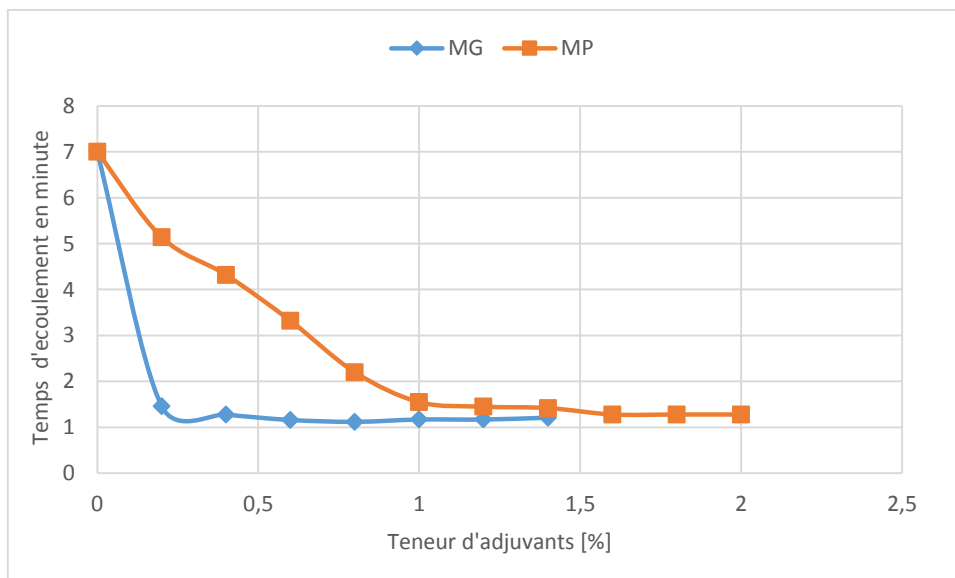
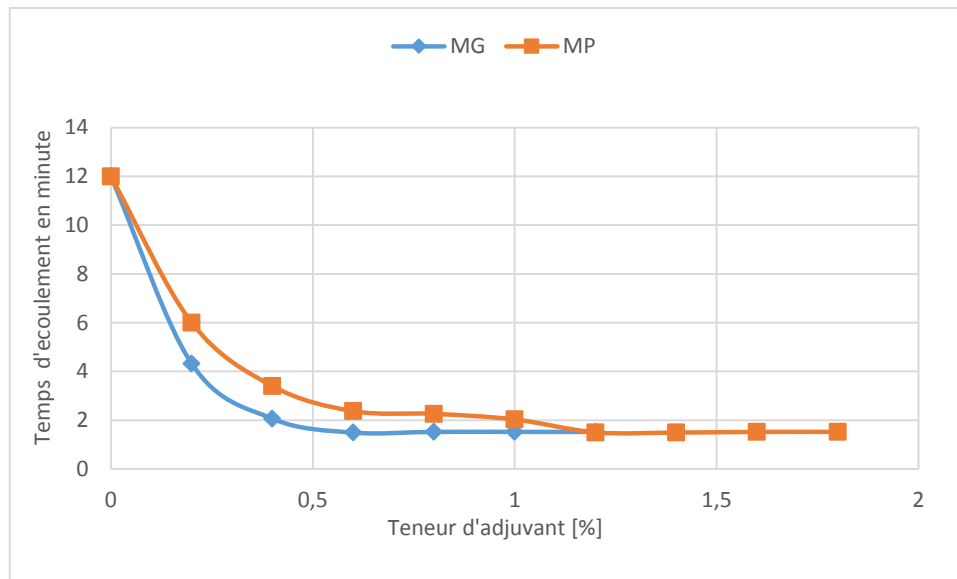


Figure III.2 : Evolution du temps d'écoulement des coulis à base du CPJ en fonction du type d'adjuvant et sa teneur

Tableaux III.11 : Temps d'écoulement des coulis à base du CRS

Teneur adjuvant [%]	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
Temps [min] <i>MasterGlenium (MG)</i>	12	4.32	2.06	1.49	1.52	1.52	1.52	/	/	/
Temps [min] <i>MasterPozzolith (MP)</i>	12	6	3.4	2.37	2.26	2.03	1.5	1.49	1.52	1.52

**Figure III.3 :** Evolution du temps d'écoulement des coulis à base du CRS en fonction du type d'adjuvant et de sa teneur

Les résultats obtenus montrent que plus le pourcentage de l'adjuvant introduit augmente, le temps d'écoulement des coulis diminue nettement, autrement dit, la viscosité des mélanges diminue, cela est valable pour les trois types de ciments utilisés. Ce phénomène peut s'expliquer par l'effet dispersant des adjuvants qui entraîne la dispersion des particules de ciment par effet électrostatique ou encombrement stérique ainsi que la libération de l'eau de gâchage emprisonnée entre les grains. A titre indicatif, le temps d'écoulement passe de 10 minutes dans les mélanges à base du CPA non adjuvés à moins de 2 minutes avec une concentration de 0.4% de l'adjuvant *MasterGlenium* (MG).

On peut distinguer également que l'adjuvant *MasterGlenium* provoque un effet plus rapide et plus intense par rapport au *MasterPozzolith* et ce, en matière de fluidification des mélanges ce qui confirme sa nature de superplastifiant.

On remarque également que l'adjuvant *MasterGlenium* est plus efficace, autrement dit, avec des concentrations plus faibles, la fluidité maximale est atteinte. Cette efficacité est traduite par ce qu'on appelle le dosage à saturation des adjuvants. A titre d'exemple, dans les coulis que ce soit à base du CPA ou CPJ, le dosage à saturation du *MasterGlenium* est atteint juste avec une concentration estimée entre **0.4%** à **0.6%**. En revanche, pour le *MasterPozzolith*, les dosages à saturation respectifs estimés avoisinent **0.8%** et **1.1%** dans les coulis à base du CPA et CPJ. Le même comportement rhéologique

est observé dans les coulis à base du CRS entre les deux adjuvants où l'effet du *MasterPozzolith* est moins intense jusqu'à un dosage critique.

4. Etude rhéométrique

Le comportement rhéologique des pâtes préparées avec chaque type de ciment et dosés avec le superplastifiant *MasterGlenium sky 841* (MG) nous a permis d'obtenir les rhéogrammes ci-dessus :

Les Figures III.4, III.5 et III.6 montrent l'évolution de la contrainte de cisaillement τ des coulis à base des trois types de ciments (CPA, CPJ, CRS) en fonction de la vitesse de cisaillement. Le dosage du superplastifiant introduit est varié.

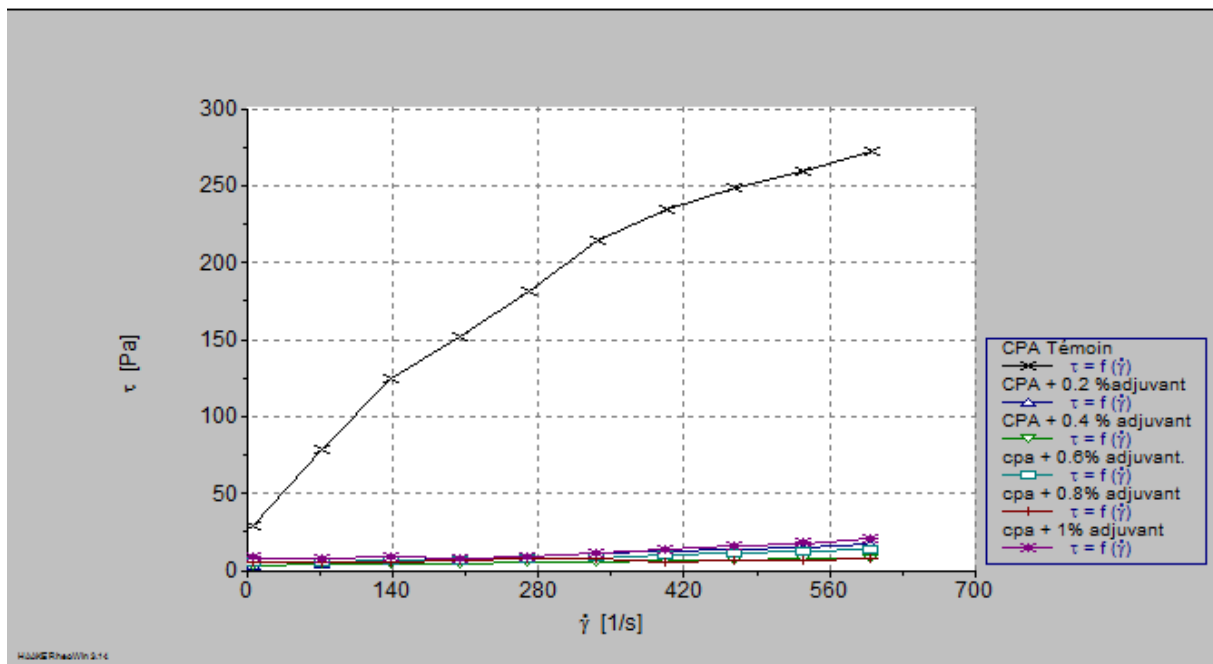


Figure III.4 : Evolution de contrainte de cisaillement des coulis à base du CPA en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec le superplastifiant *MasterGlenium*

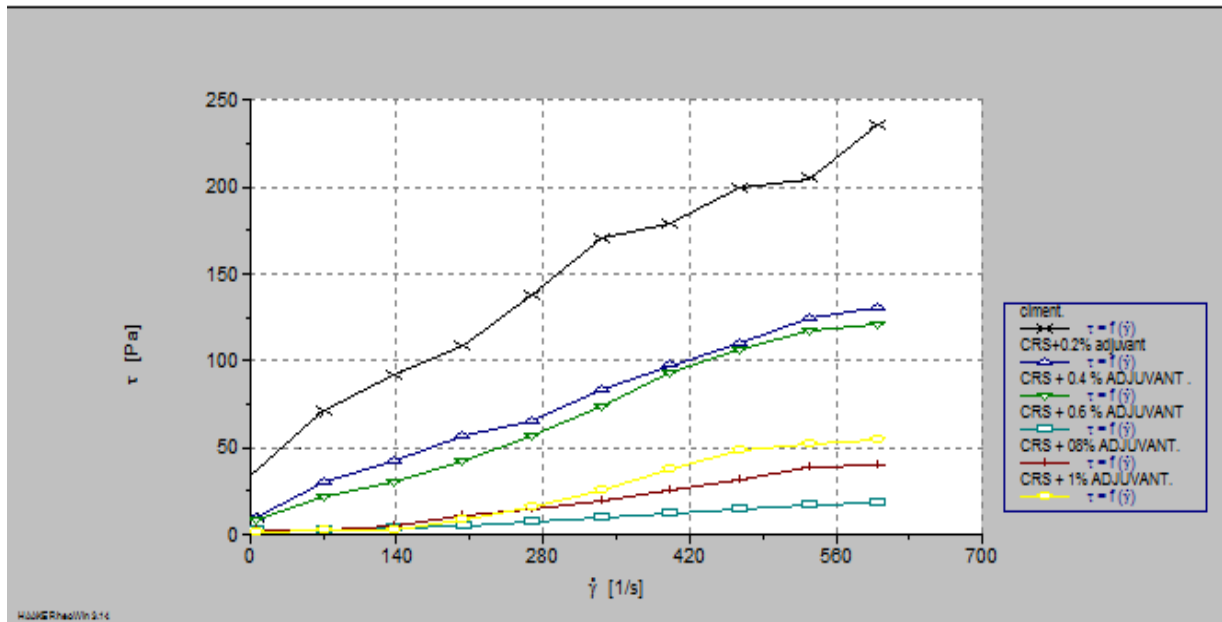


Figure III.5 : Evolution de contrainte de cisaillement des coulis à base du CRS en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec le superplastifiant MasterGlenium

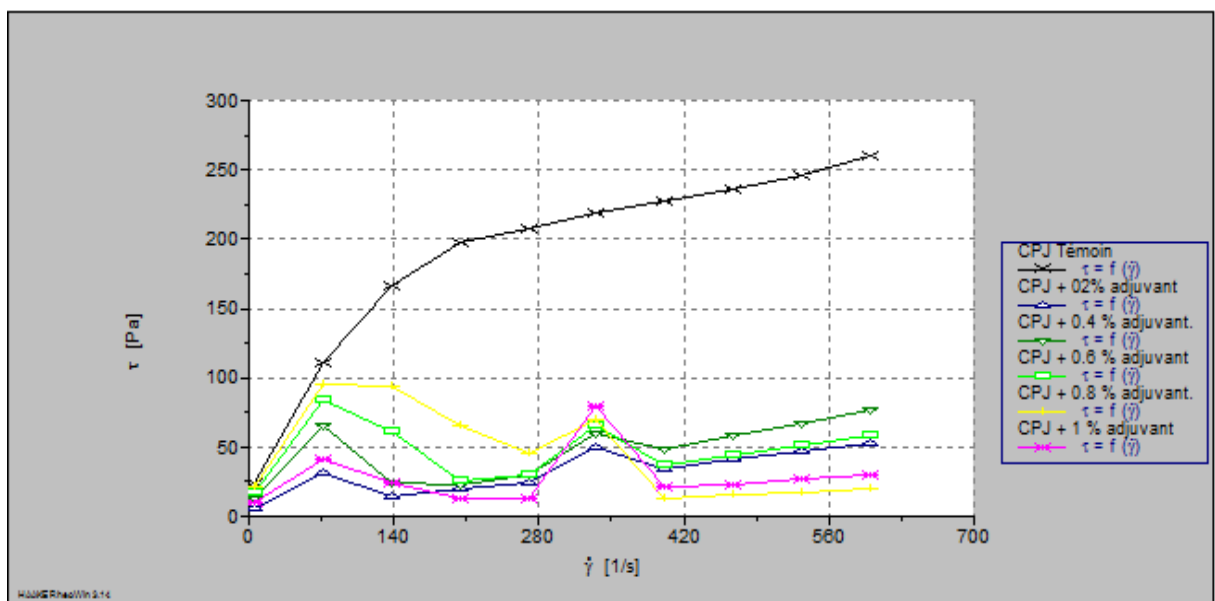


Figure III.6 : Evolution de la contrainte de cisaillement des coulis à base du CPJ en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec le superplastifiant MasterGlenium

Les courbes des Figure III.4 et III.5 montre clairement une nette différence entre les valeurs des contraintes seuils des échantillons témoins (sans adjuvant) et celles des coulis adjuvés avec le *MasterGlenium*. On peut noter que la contrainte seuil diminue sensiblement avec l’incorporation de l’adjuvant et elle continue de diminuer avec l’augmentation du pourcentage de l’adjuvant incorporé. Cela signifie que les coulis deviennent de plus en plus fluides sous l’impact de l’adjuvant qui dispersent les particules de ciment.

Les différents coulis adjuvés ou non peuvent être assimilés à des suspensions viscoplastiques. Cela veut dire qu'au-dessous d'une valeur de la contrainte critique (c.-à-d. 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 du fluide de Bingham. Dans notre cas, le comportement n'est pas tout à fait linéaire et peut bien corrélérer avec le modèle d'*Herschel Buckley*.

Le changement de comportement rhéologique observé est dû à un changement de viscosité des mélanges. En effet, les valeurs des contraintes appliquées par le rhéomètre diminuent avec la diminution de la viscosité des coulis, sous l'effet de l'adjuvant superplastifiant. Nous concluons que l'adjuvant et surtout sa teneur ont un effet sensible sur le comportement rhéologiques des pâtes cimentaires. De plus, l'absence de bruit dans les courbes, est une preuve que le mélange (ciment/adjuvant) est parfaitement homogène et c'est ce que nous renseigne sur la compatibilité du couple superplastifiant (*MasterGlenium*) utilisé avec les deux ciments (CPA et CRS).

La Figure III.6 illustre un comportement rhéologique assez perturbé avec des augmentations et diminutions aléatoires de la contrainte de cisaillement. Cela est certainement dû à l'hétérogénéité du mélange (ciment/adjuvant) où des phases non miscibles sont constatées (Voir Figure III.7). La diminution brusque des contraintes coïncident avec les phases fluides (contraintes faible) et leur augmentation correspond à la phase '*coulis ordinaire*'. Cela explique sont appuyées également par la difficulté rencontrée lors du malaxage des deux matériaux ainsi que la décantation du ciment et l'apparition d'une couche jaunâtre sur la partie supérieure avec des '*fissures*' sur les parois de l'éprouvette comme l'illustre la Figure III.7. A noter que l'incompatibilité ciment/adjuvant peut se manifester par différentes manières.

Nous affirmer que le superplastifiant *MasterGlenium sky 841* est incompatible avec le ciment CPJ récupéré de la cimenterie de Meftah (Blida).



Figure III.7 : Mise en évidence du phénomène d'incompatibilité (Ciment/Adjuvant) rencontré

Les Figures III.8, III.9 et III.10 présentent la variation de la viscosité des coulis (CPA, CPJ, CRS) en fonction du gradient de vitesse, et ce, sous l'effet de la teneur de l'adjuvant superplastifiant *MasterGlenium*.

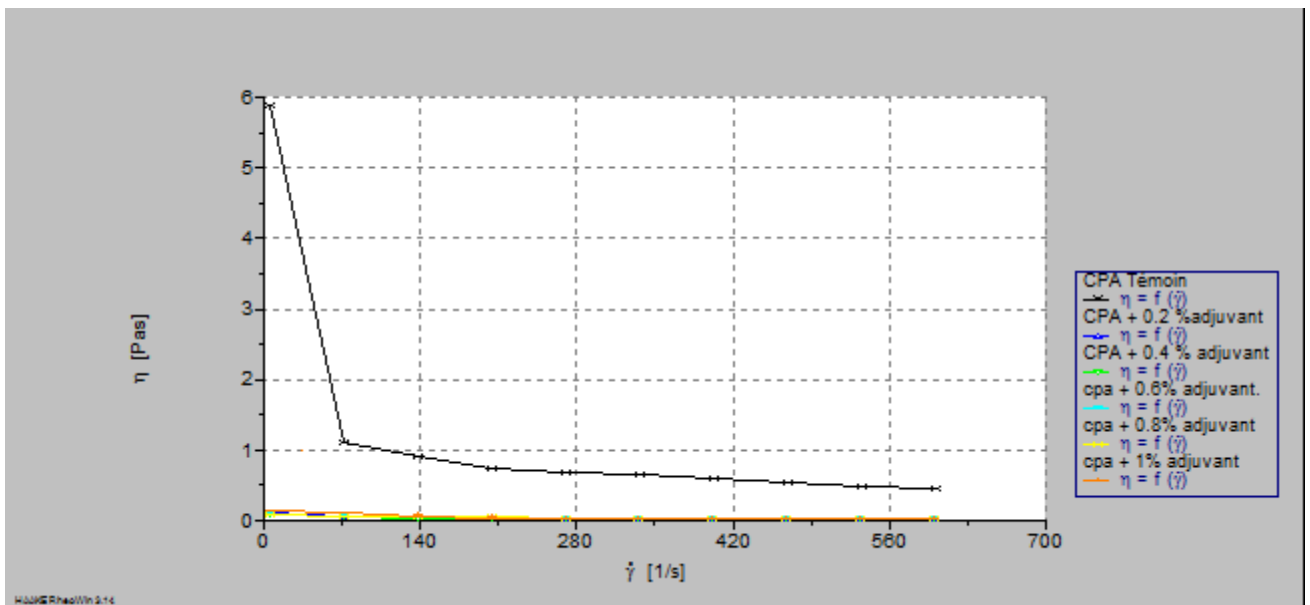


Figure III.8 : Variation de la viscosité des coulis à base du CPA en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec différentes teneurs de l'adjuvant MG.

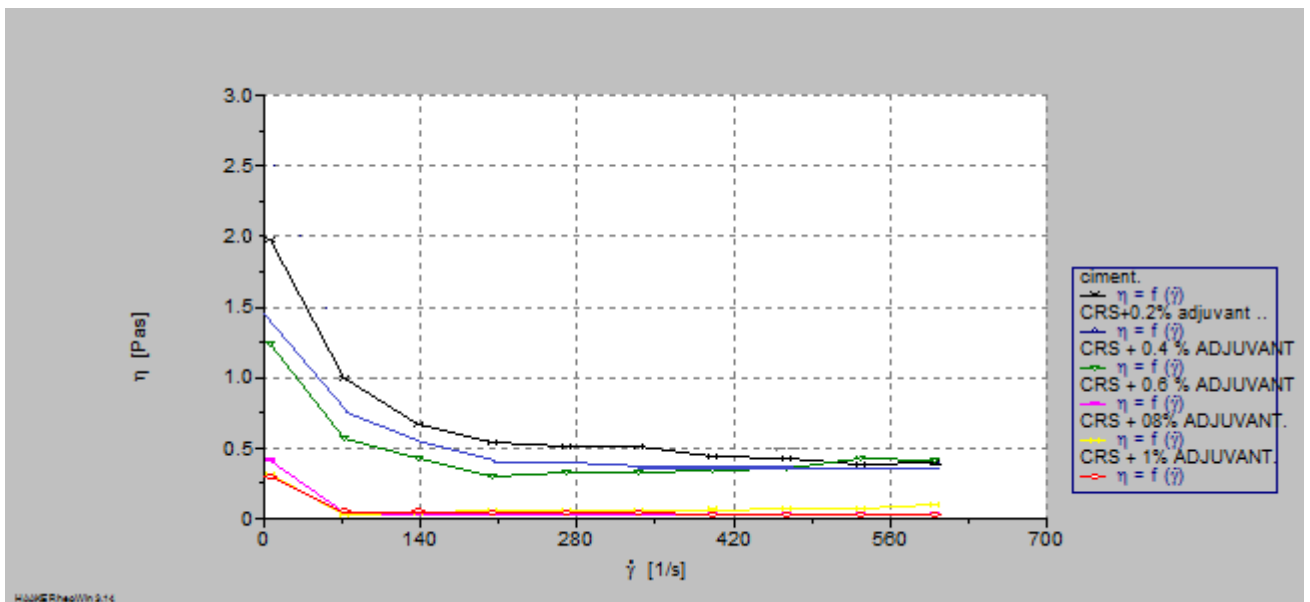


Figure III.9 : Variation de la viscosité des coulis à base du CRS en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec différentes teneurs de l'adjuvant MG

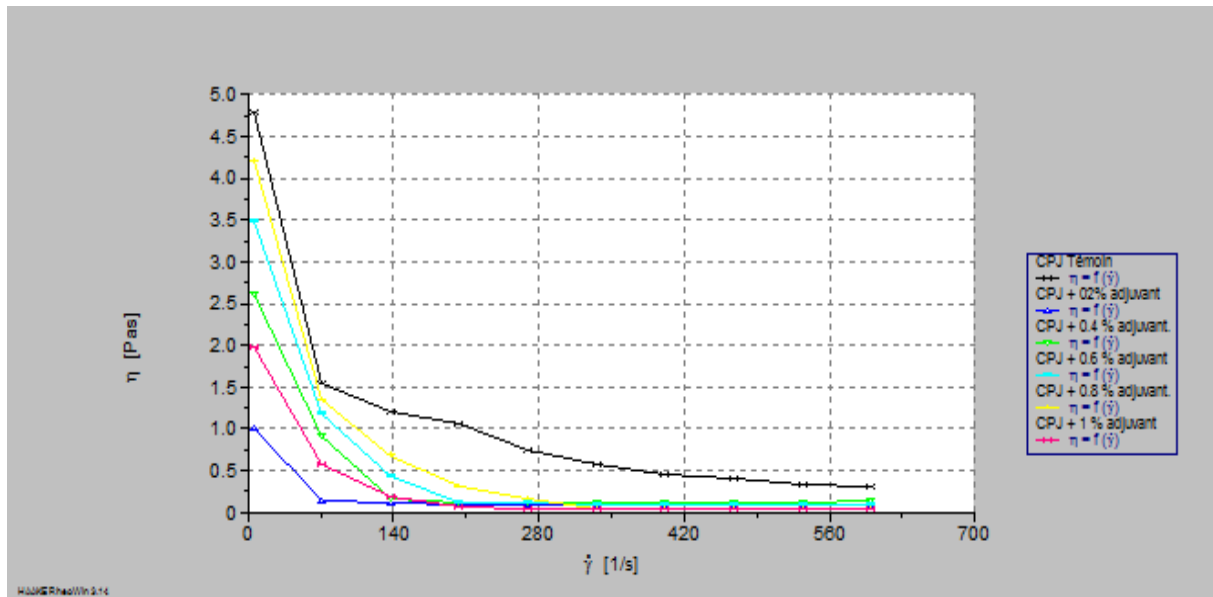


Figure III.10 : Variation de la viscosité des coulis à base du CPJ en fonction de la vitesse de cisaillement, dosés avec différentes teneurs de l'adjuvant MG

Les Figures III.8 et III.9 montrent bien que la viscosité de toutes les pâtes cimentaires y compris celle ne contenant pas d'adjuvant diminuent en fonction de la vitesse de cisaillement, cela signifie que les mélanges peuvent être classés comme étant des fluides rhéofluidifiants. On peut remarquer aussi que l'adjuvant *MasterGlenium* a un effet considérable sur la viscosité des pâtes de ciment, l'allure des courbes montrent que la viscosité des coulis diminue avec l'augmentation de la proportion du superplastifiant et ce, de façon régulière. Pour les coulis à base du CPA, on remarque que le fait d'introduire une concentration minimale d'adjuvant diminue considérablement la viscosité des mélanges et la rend presque constante, celle-ci se stabilise malgré l'augmentation de la teneur de l'adjuvant.

La Figure III.10 représente le cas l'incompatibilité (ciment/adjuvant) et montre l'irrégularité de l'augmentation et la diminution de viscosité en fonction de l'augmentation de pourcentage de superplastifiant, cette perturbation est liée par la perturbation des contrainte (Figure : III.6).

Afin de déduire approximativement le point de saturation de l'adjuvant employé pour chaque type de ciment, une corrélation est réalisée entre les deux paramètres rhéologiques calculés à savoir la contrainte seuil τ_0 et la viscosité η en fonction de la concentration de l'adjuvant superplastifiant introduit. Les Figures III.11 ; III.12 et III.13 illustrent l'allure des courbes obtenues.

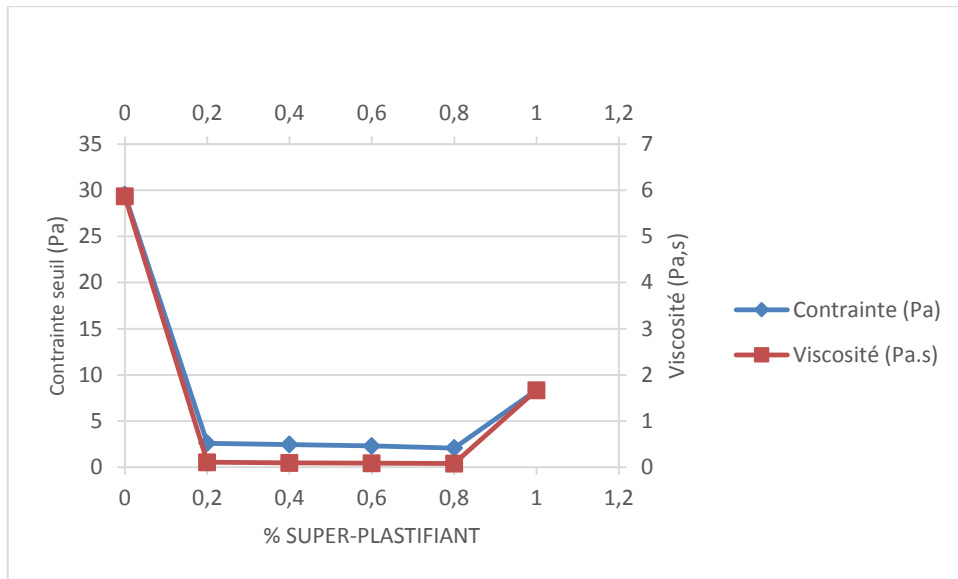


Figure III.11 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis à base du CPA en fonction de pourcentage du superplastifiant MG.

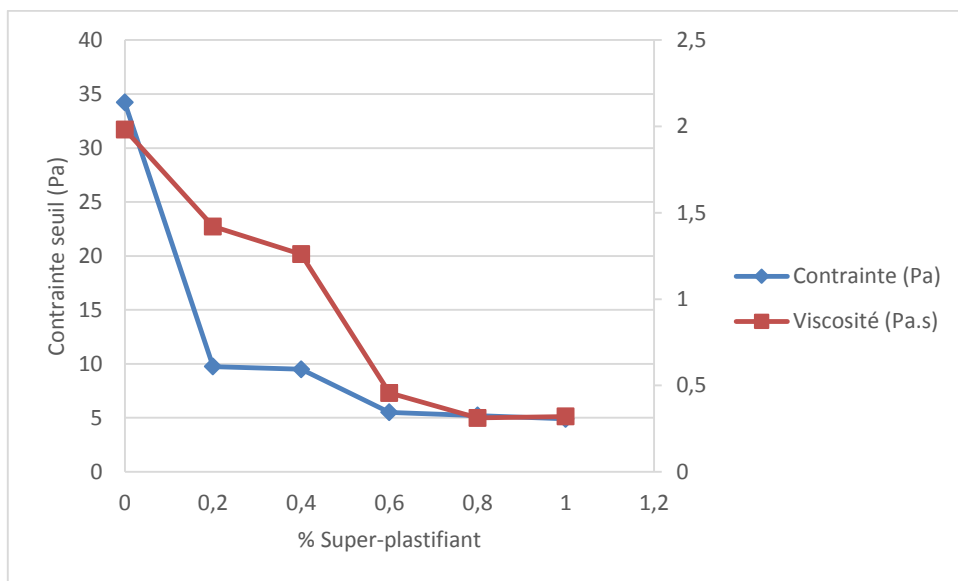


Figure III.12 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis à base du CRS en fonction de la teneur du superplastifiant MG

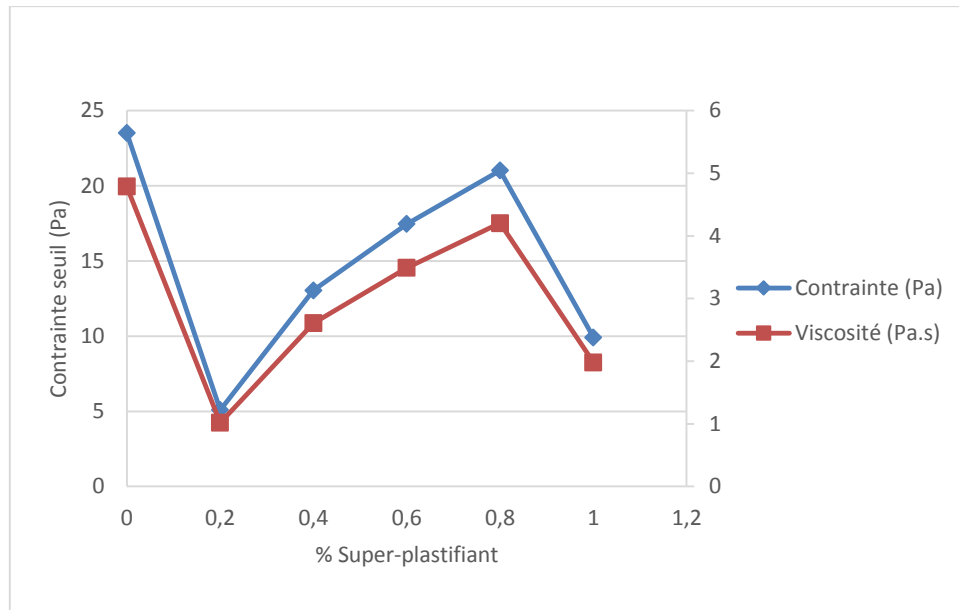


Figure III.13 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis à base du CPJ en fonction de la teneur du superplastifiant MG

La Figure III.11 montre une efficacité extrêmement élevée du superplastifiant sur le ciment CPA où le point de saturation se situe à concentration très réduite (à partir de 0.2%), où les paramètres rhéologiques sont presque stables (très légère diminution) jusqu'à un pourcentage de 0.8%. Ces résultats corroborent parfaitement avec les rhéogrammes contraintes de cisaillement/vitesses de cisaillement ainsi que les courbes de viscosités préalablement traitées. Un léger effet inverse est par contre constaté à partir de 0.8%. Nous concluons que le point de saturation approximatif de l'adjuvant vis à vis du ciment CPA se situe entre 0.2 à 0.8% par rapport à la masse du ciment.

La Figure III.12 montre une diminution des valeurs de la contrainte seuil et de la viscosité jusqu'à ce que les valeurs se stabilisent entre 0.6% à 0.8% environ. Cet intervalle peut être considéré comme le dosage à saturation du superplastifiant MG par rapport au ciment CRS.

La Figure III.13 présente le cas d'incompatibilité ciment/superplastifiant, où les courbes sont aléatoires et inexploitable, cela confirme que le superplastifiant *MasterGlenium* est inapproprié avec le ciment CPJ.

La caractérisation rhéologique des différents coulis conçus avec les trois types de ciments, cette fois-ci dosés avec le plastifiant *MasterPozzolith N 399* nous a permis à obtenir les résultats ci-après.

Les Figures III.14, III.15 et III.16 présentent l'évolution de la contrainte de cisaillement des coulis de ciments (CPA, CPJ, CRS) en fonction de la vitesse de cisaillement. Le plastifiant *MasterPozzolith N 399* a été incorporé à différentes teneurs.

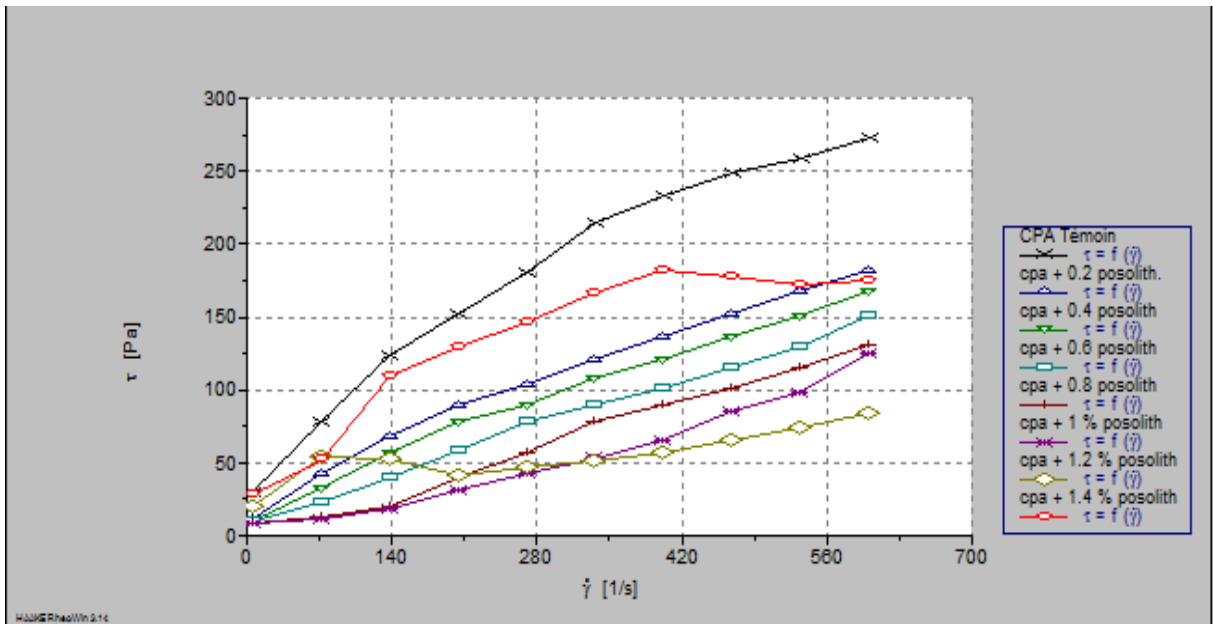


Figure III.14 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse des coulis à base du ciment CPA contenant différentes teneurs en plastifiant MasterPozzolith

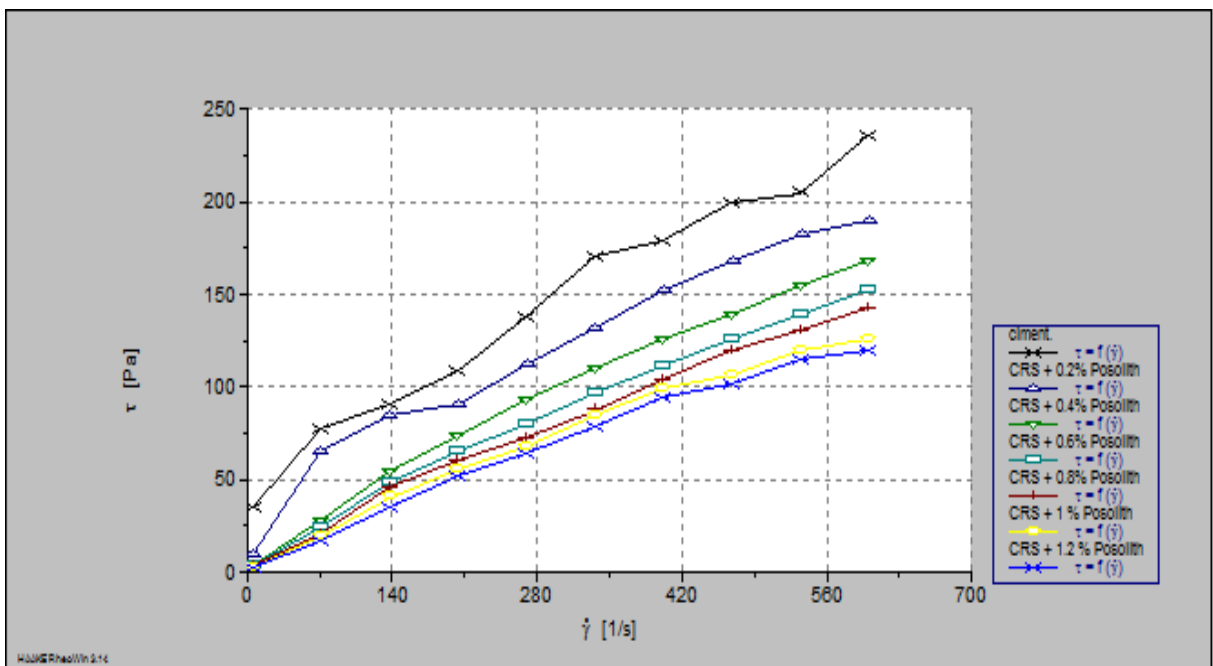


Figure III.15 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse des coulis du ciment CRS contenant différentes teneurs du plastifiant MasterPozzolith

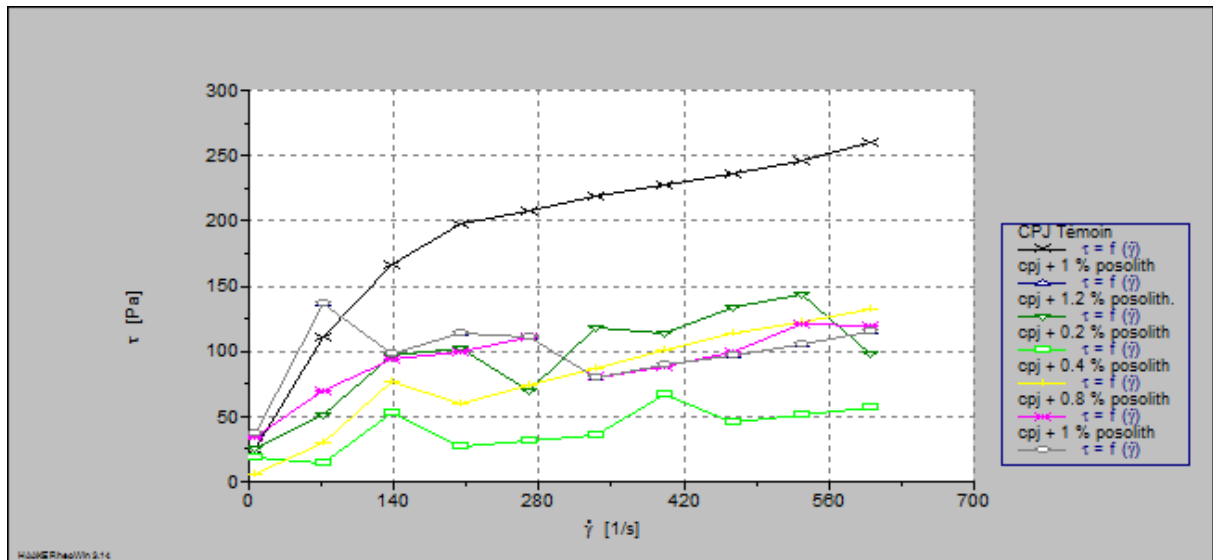


Figure III.16 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse des coulis du ciment CPJ contenant différentes teneurs du plastifiant MasterPozzolith

Les courbes des Figures III.14 et III.15 montrent que l'adjuvant plastifiant possède le même effet rhéologique sur les coulis cimentaires mais son impact est moins intense par rapport au superplastifiant. Autrement dit, l'effet fluidifiant augmente au fur et à mesure avec la concentration de l'adjuvant incorporé.

Nous pouvons souligner aussi la régularité de la diminution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage du plastifiant, cela est bien visible sur les courbes de Figure III.15. En revanche, nous remarquons un effet inverse i.e. les coulis deviennent rhéoépaississants à partir d'une concentration critique égale à 1.2%, ce phénomène se met clairement en évidence avec un dosage de 1.4%. Nous suggérons que les molécules du polymère non adsorbé modifient la viscosité du fluide interstitiel. Cette modification peut être corrélée à la structure moléculaire du polymère. La Figure III.14 montre ce phénomène de floculation où la contrainte seuil redevient plus élevée sous l'effet d'un "excès" d'adjuvant.

La figure III.16 illustre un cas d'incompatibilité du plastifiant utilisé avec le ciment CPJ. Des courbes irrégulières de l'évolution des contraintes sont enregistrées, ce résultat explique la difficulté de mélangeage et la décantation de ciment pendant l'essai.

Les Figures (III.17, III.18 et III.19) présentent la variation de la viscosité en fonction du gradient de vitesse des coulis des ciments (CPA, CPJ, CRS) sous l'effet du dosage du plastifiant *MasterPozzolith*.

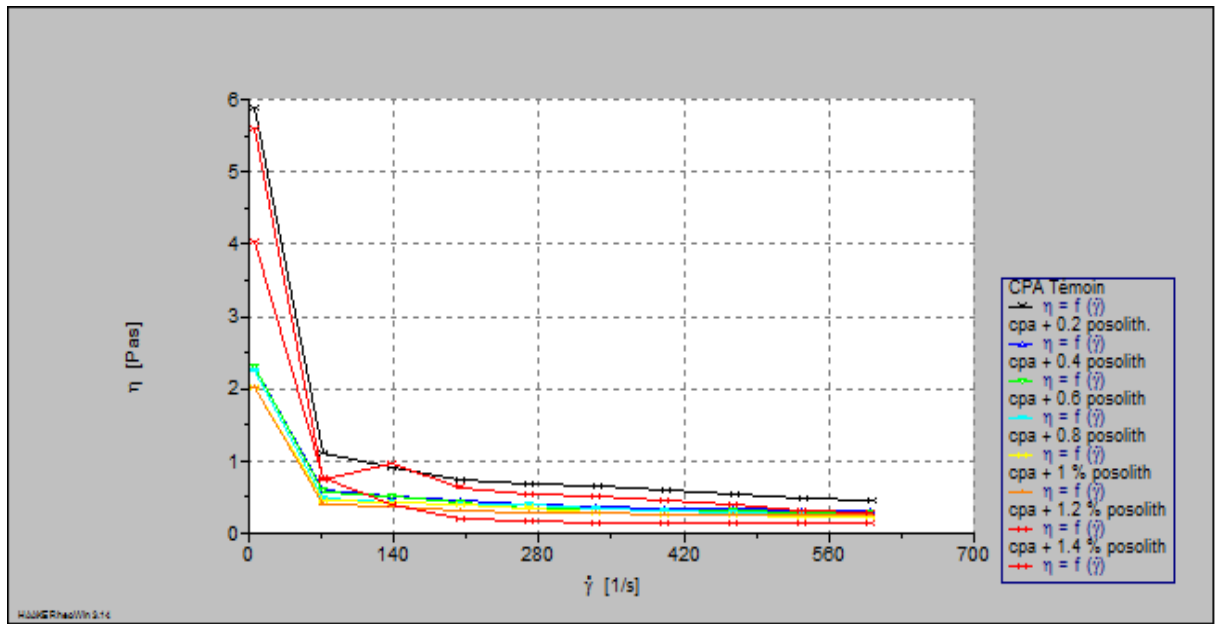


Figure III.17 : Variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement des coulis à base du ciment CPA contenant le plastifiant MasterPozzolith

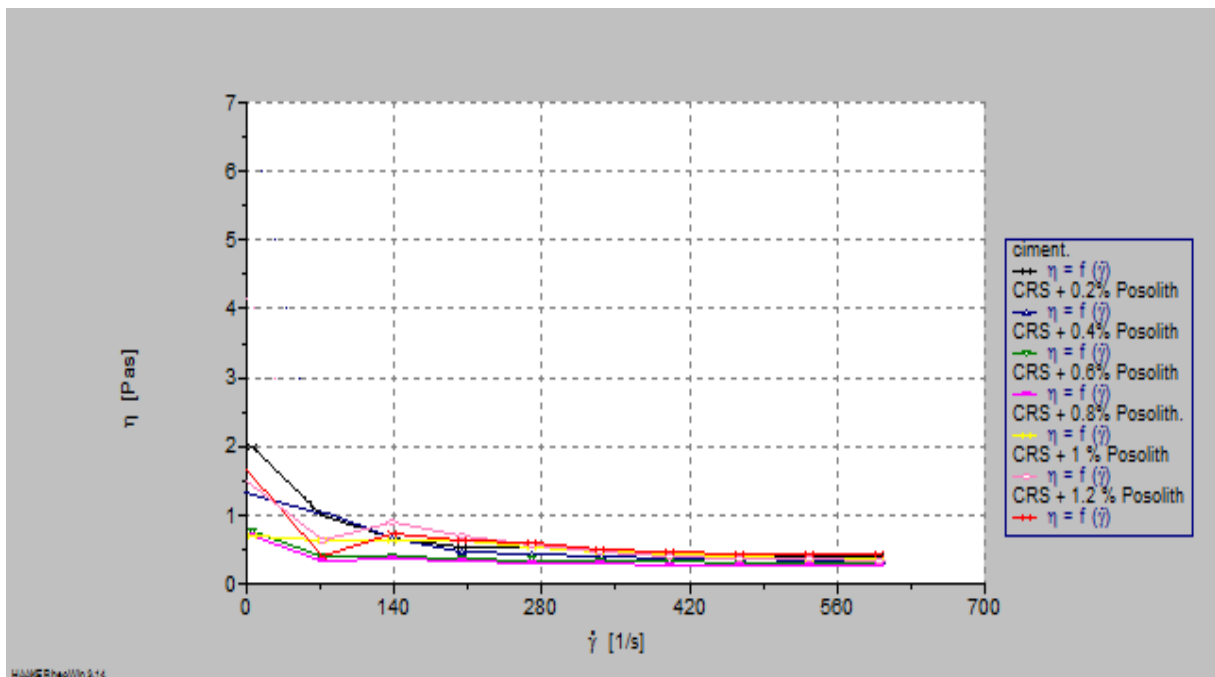


Figure III.18 : Variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement des coulis à base du ciment CRS contenant le plastifiant MasterPozzolith

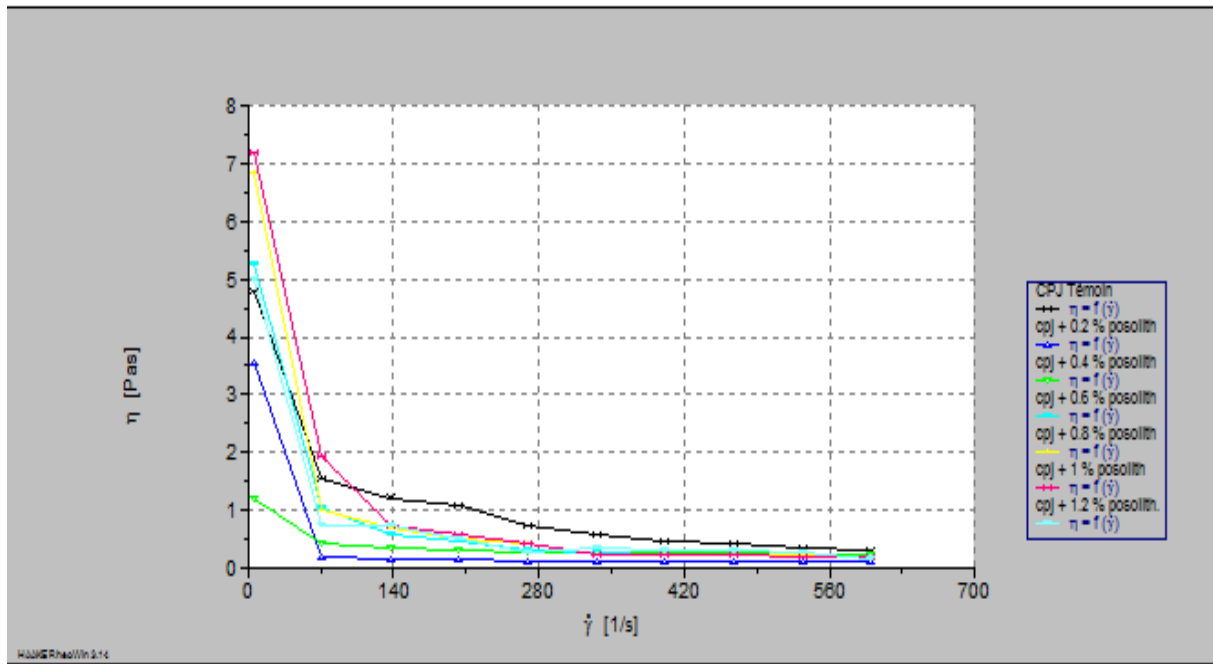


Figure III.19 : Variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement des coulis à base du ciment CPJ contenant le plastifiant MasterPozzolith

Les Figures III.17 et III.18 montrent que la viscosité des pâtes cimentaires diminue régulièrement avec l'augmentation du pourcentage du plastifiant mais de manière moins intense et lente par rapport au superplastifiant. On peut remarquer aussi que les valeurs de la viscosité des coulis à base du CRS sont réduites même à des gradients de vitesse minimum et tend à se stabiliser plus rapidement comparées à celles des deux autres ciments.

La Figure III.19 représente des courbes de viscosité irrégulières et aléatoires du cas d'incompatibilité CPJ/plastifiant.

Les Figures III.20, III.21 et III.22 présentent respectivement l'évolution des paramètres rhéologiques (contrainte seuil τ_0 et la viscosité η) calculés sur les coulis des ciments (CPA, CRS et CPJ) en fonction du pourcentage du plastifiant. Cela nous permettra de déduire les plages des dosages à saturation de l'adjuvant par rapport à chaque type de ciment utilisé.

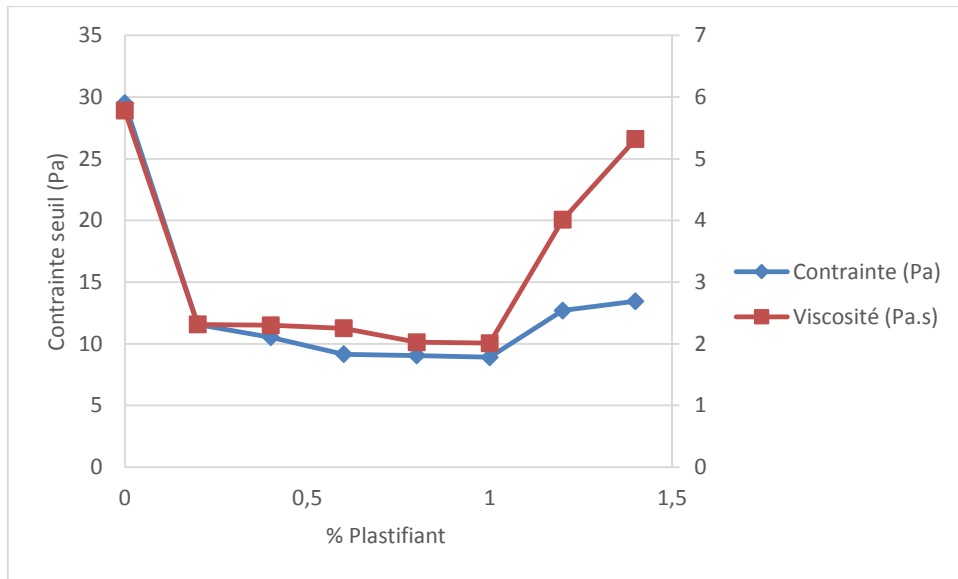


Figure III.20 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis à base de ciment CPA en fonction du pourcentage du plastifiant.

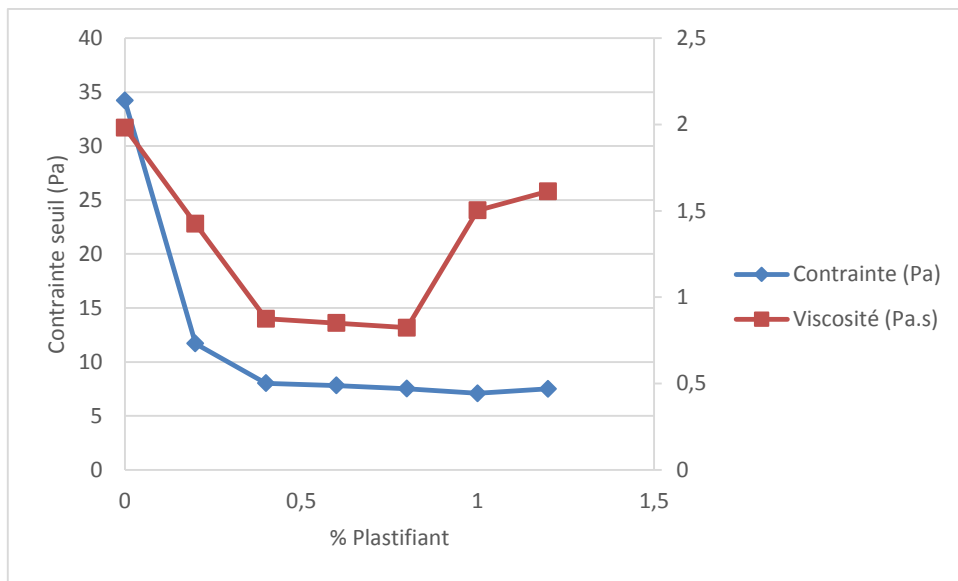


Figure III.21 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis du ciment CRS en fonction du pourcentage du plastifiant

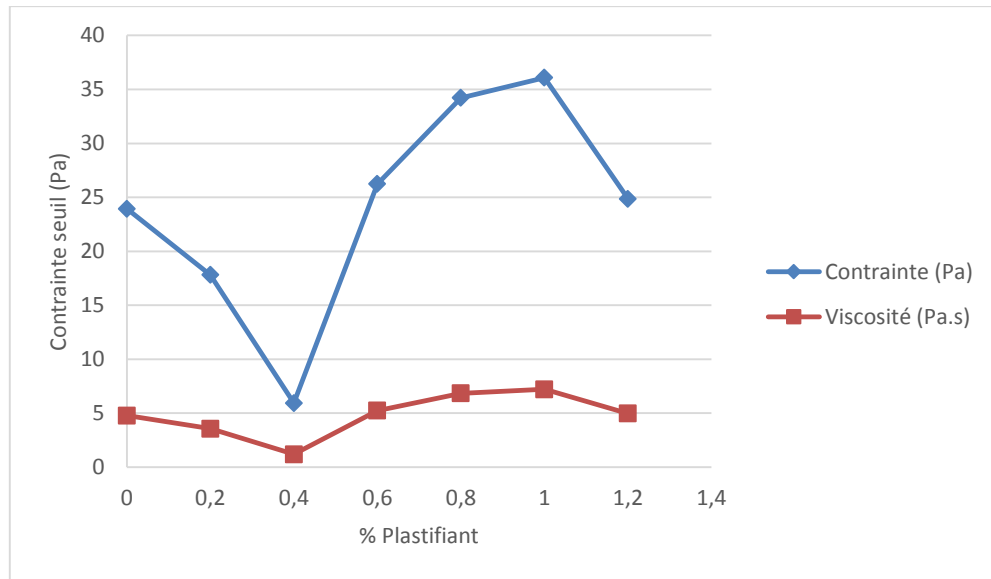


Figure III.22 : Evolution des paramètres rhéologiques (τ_0 et η) des coulis à base du ciment CPJ en fonction du pourcentage du plastifiant

La figure III.20 montre une nette diminution de la contrainte seuil et la viscosité des coulis contenant l'adjuvant plastifiant comparé au mélange non adjuvanté. En effet, une légère diminution des valeurs des deux paramètres rhéologiques est ensuite enregistrée entre des concentrations d'adjuvant de 0.2 à 1%. Au-delà de cette valeur (1%), les valeurs des paramètres rhéologiques commencent à augmenter à cause éventuellement de la floculation du mélange. Nous pouvons dire littéralement que le pourcentage de 1% représente le point critique de saturation du plastifiant *MasterPozzolith* par rapport au ciment CPA. Ces résultats corroborent parfaitement avec les résultats de la figure III.14.

La Figure III.21 met aussi en évidence l'effet du plastifiant sur le ciment CRS. En effet, la diminution de la contrainte seuil commence à partir d'une concentration de 0.2% et continue à décliner même au-delà de 1%, pour cela nous considérons que le point de saturation de cet adjuvant par rapport au ciment CRS se situe dans la plage comprise entre 1 et 1.4%. En revanche, la viscosité du mélange enregistre une légère augmentation et ce dès un dosage en plastifiant de 0.8%.

La Figure III.22 présente le cas d'incompatibilité ciment/plastifiant, où les courbes sont aléatoires et inexploitable et la courbe de la contrainte seuil τ_0 est située au-dessus de la courbe de la viscosité η contrairement au cas précédent, cela confirme que le plastifiant *Masterpozzolith* est inapproprié avec le ciment CPJ.

5. Caractérisation du mortier

5.1. Masse volumique M_v

Le Tableau III.12 affiche les résultats de mesure de la masse volumique du mortier à base du ciment CPA à l'âge de 2, 7 et 28 jours de durcissement.

Tableau III.12 : Résultats de mesure de la densité du mortier normalisé sans adjuvant

Echéance (Jours)	2	7	28
Masse (g)	281.6	595.8	610
Volume (cm ³)	256	256	256
Mv (g/cm ³)	2.27	2.32	2.38

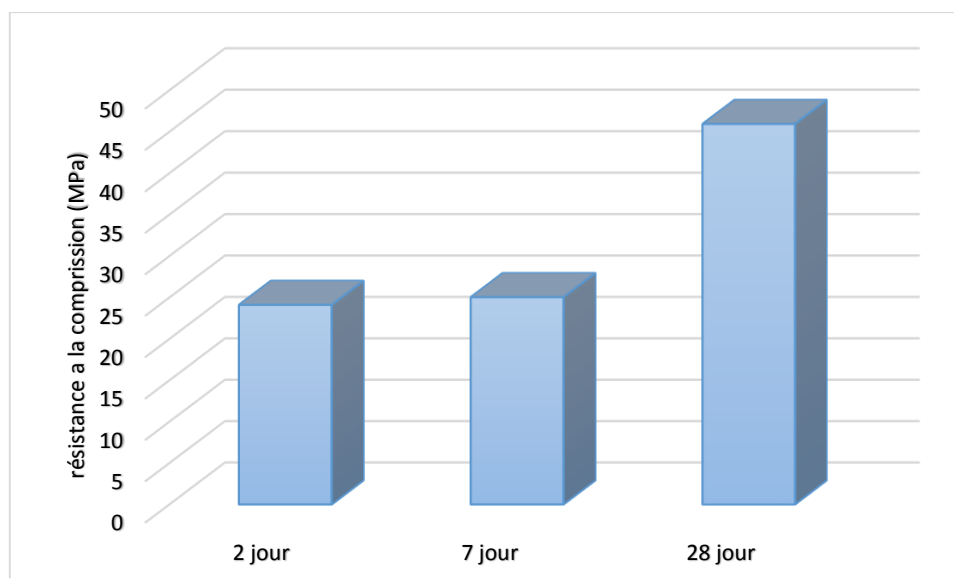
On remarque que la masse volumique des échantillons du mortier évolue légèrement en fonction de l'âge, cela est dû à la formation de nouveaux composés (Ex CSH), conséquence des réactions d'hydratation qui se poursuivent avec le temps. Les produits formés contribuent à la densification de la structure.

5.2. Résistance à la compression du mortier

Le Tableau III.13 et la Figure III.23 donnent les résultats de la résistance à la compression du mortier élaboré à base du ciment CPA à 2, 7, et 28 jours.

Tableau III.13 : Résultats de la résistance à la compression du mortier

Echéance (jour)	2	7	28
Résistance (MPa)	24.11	25.039	45.945

**Figure III.23** : Résistance à la compression du mortier à base du ciment CPA en fonction de l'âge

Le ciment utilisé est le ciment CPA CEM I 42.5 R, fabriqué par la cimenterie de Biskra. On peut noter que la résistance du mortier est assez élevée à court terme (2 jours), presque la même valeur de résistance est maintenue jusqu'à 7 jours. A 28 jours, la résistance du mortier a atteint 45.945 MPa, ce qui correspond à un gain de résistance mécanique de 83.5%. On peut conclure que la classe du ciment utilisé est justifiée.

6. Caractérisation du béton

Afin de mettre en évidence l'effet des deux types d'adjuvants utilisés sur les propriétés physicomécaniques, trois bétons ordinaires ont été élaborés dont un béton sans adjuvant, considéré comme échantillon référence.

6.1. Masse volumique Mv

Les résultats de la masse volumique des trois bétons élaborés sont donnés dans les tableaux III.14, III.15 et III.16.

Tableau III.14 : Masse volumique du béton non adjuvanté (échantillon témoin)

Béton témoin			
L'âge du béton	Masse (g)	Volume (cm ³)	Mv (g/cm ³)
Béton frais	7777.6	3375	2.30
7 jours	7999	3375	2.37
14 jours	8181.2	3375	2.42
28 jours	7962.1	3375	2.36

Tableau III.15 : Masse volumique du béton adjuvanté par le superplastifiant MasterGlenium

Béton + MasterGlenium			
L'âge du béton	Masse (g)	Volume (cm ³)	Mv (g/cm ³)
Béton frais	8144.6	3375	2.41
7 jours	8072.3	3375	2.39
14 jours	8140.1	3375	2.41
28 jours	8187.6	3375	2.42

Tableau III.16 : Masse volumique du béton adjuvanté par le plastifiant MasterPozzolith

Béton + MasterPozzolith			
L'âge du béton	Masse (g)	Volume (cm ³)	Densité
Béton frais	7862.2	3375	2.33
7 jours	8045.6	3375	2.38
14 jours	8157.4	3375	2.42
28 jours	8126.9	3375	2.41

Les résultats montrent que la masse volumique des bétons à l'état frais est légèrement inférieure par rapport à celle enregistrée à l'état durci sauf pour le béton contenant le superplastifiant *MasterGlenium* qui enregistre des valeurs constantes à tous les âges.

6.2. Résistance à la compression du béton

Les Tableaux III.17, III.18 et III.19 présentent les contraintes limites en compression des trois bétons à différents âges de durcissement. La Figure III.24 illustre les résultats obtenus sous forme d'un graphique.

Tableau III.17 : Résistance à la compression R_c du béton témoin

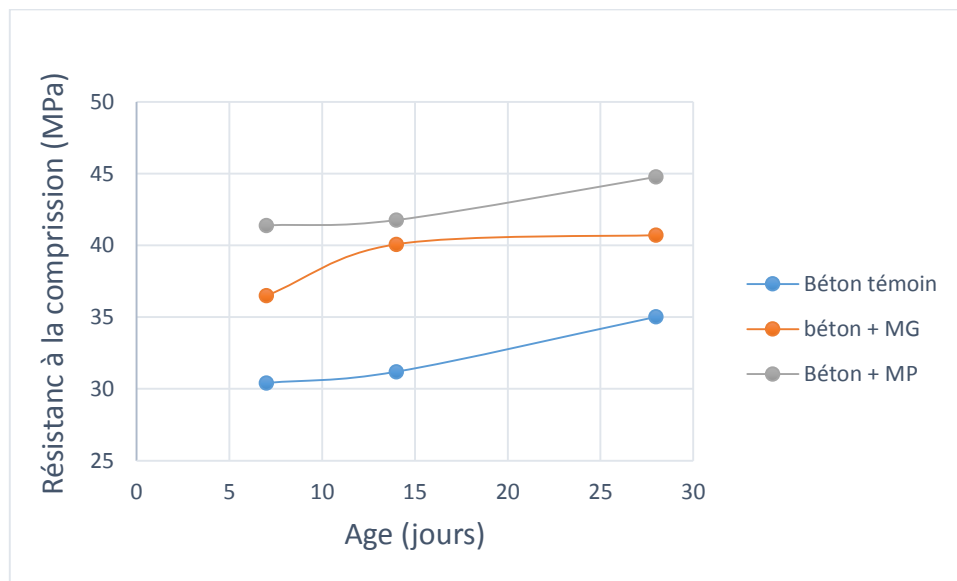
Temps de durcissement	7 jours	14 jours	28 jours
R_c [MPa]	32.175	30.872	32.7
	28.652	31.527	37.34
Moyenne	30.414	31.2	35.02

Tableau III.18 : Résistance à la compression R_c du béton adjuvanté par le superplastifiant

Temps de durcissement	7 jours	14 jours	28 jours
R_c [MPa]	35.169	42.341	38.562
	37.835	37.817	42.858
Moyenne	36.502	40.079	40.71

Tableau III.19 : Résistance à la compression R_c du béton adjuvanté par le plastifiant

Temps de durcissement	7 jours	14 jours	28 jours
R_c [MPa]	44.958	37.679	43.718
	37.828	45.850	45.825
Moyenne	41.393	41.765	44.771

**Figure III.24** : Evolution de la résistance à la compression des trois bétons en fonction du temps de durcissement

Les résultats obtenus montrent une nette amélioration des résistances des échantillons du béton en fonction du temps de durcissement, cela est valable pour les trois bétons testés. Cette augmentation des performances mécaniques peut s'expliquer par le développement des réactions d'hydratation avec le temps et la formation de nouveaux hydrosilicates de calcium densifiant ainsi la structure des matériaux.

On peut également distinguer que les résistances à la compression des bétons adjuvés sont nettement meilleures que celle du béton sans adjuvant, d'où l'intérêt d'employer ces produits chimiques devenus incontournables. En effet, à ouvrabilité égale, les adjuvés contribuent à réduire le ratio E/C ce qui influe positivement sur les résistances mécaniques des échantillons.

Les résistances initiales atteintes aux jeunes âges sont élevées surtout avec le plastifiant *MasterPozzolith*. Il est à noter que l'adjuvant plastifiant favorise un plus grand développement de la réaction d'hydratation du ciment grâce à son effet accélérateur et réduit la quantité d'eau utilisée par son effet de mouillage, ce qui se traduit par une augmentation significative des résistances à la compression initiales.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on s'est proposé d'étudier l'effet des adjuvants de différentes nature (plastifiant et superplastifiant) sur les propriétés rhéologiques à l'état frais de pâtes cimentaires et sur les performances mécaniques à l'état durci des bétons. Trois ciments commerciaux algériens ont été sélectionnés à savoir un ciment Portland artificiel CPA, un ciment Portland aux ajouts CPJ et enfin un ciment résistant aux sulfates CRS.

Au terme de cette étude expérimentales et à travers les résultats obtenus, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- Les deux adjuvants étudiés ont une influence significative sur les propriétés rhéologiques des coulis à l'états frais en améliorant considérablement la coulabilité des pâtes, ce qui facilitera par conséquent l'opération de mise en œuvre.
- Outre la réponse aux besoins rhéologiques évidents (fluidité) des mélanges cimentaires, les deux adjuvants étudiés améliorent également et nettement les performances mécaniques par rapport au béton de référence non adjuvanté.
- Le superplastifiant *MasterGlenium* s'est avéré plus efficace et son effet est plus intense que le plastifiant *MasterPozzolith*. Autrement dit, pour une fluidité visée, des dosage moins élevés en *MasterGlenium* seront utilisés.
- Les plages des dosages à saturation ont été déduites par des essais rhéométriques et à l'aide d'essais au cône de Marsh. Des résultats pratiquement similaires sont obtenus avec ces deux méthodes. En revanche, il est utile de signaler que les dosages à saturation des (super)plastifiants diffèrent d'un ciment à l'autre.
- La qualité et le type du ciment est un facteur primordial à prendre en considération dans le choix de l'adjuvant à utiliser. En effet l'efficacité des adjuvants dépend étroitement du type et de la qualité du ciment utilisé (composition chimique et minéralogique des ciments).
- Les deux adjuvants sont incompatibles avec le ciment aux ajouts CPJ récupéré de la cimenterie de Meftah (Blida) ; le phénomène observé s'est manifesté par une non homogénéité des mélanges et une ségrégation. En revanche, ils sont bien compatibles avec deux autres ciments CPA et CRS.
- En utilisant le ciment CPA comme liant, le plastifiant *MasterPozzolith* a donné de meilleures résistances à la compression des bétons que le superplastifiant *MasterGlenium* que ce soit à court ou à moyen termes.

Perspectives

Pour accomplir et peaufiner la présente étude et mieux interpréter les résultats obtenus, les analyses et les essais suivants sont recommandés pour les études ultérieures :

- ✓ Le temps de rétention de l'affaissement des coulis de ciment à 30 et 60 minutes ainsi que l'effet de d'autres paramètres telle la température sur la rhéologie des coulis.
- ✓ Détermination de la composition ainsi que la structure des adjuvants utilisés (masse molaire, chaine principale et chaines latérales...etc) pour pouvoir interpréter davantage les résultats obtenus.

- ✓ La quantité adsorbée du superplastifiant sur les particules de ciment (en mg/g du ciment) par l'essai du carbone organique total (*Total Organic Carbon TOC Analysis*).

*Références
bibliographique*

Références bibliographiques

- [1] : Boumediene .A, Boudoumi. A, Caractérisation et formulation d'un béton Ordinaire à base de granulats de déchet de carreaux faïence, Mémoire de Master. Université M'hamed Bougara–Boumerdès. 2019.
- [2] : Taleb Karina. Etude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des fines de mortiers de démolition sur les propriétés des mortiers. Mémoire de Master. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2016.
- [3] : Hamza khadri, Cours de matériaux de construction, les ciments. 2015
- [4] : Fiche technique CIMBETON, Tome 2. Les bétons : Formulation et mise en œuvre, R.C.S Paris janvier 2013.
- [5] : Zouai Khadija, étude du mode de fabrication du ciment et effet des matières première impact de l'utilisation du ciment sur l'environnement, Mémoire de Magister. Université Hassiba ben Bouali de Chlef. 1 juin 2011.
- [6] : Larbi. Z. Ben Messaoud. K. Etude de la compatibilité adjuvant/ciment sur un béton courant, mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès. Juin 2018.
- [8] : www.guidebeton.com/ajout-eau-beton.
- [9] : https://www.reno-info-maison.com/mortier-et-beton-les-agregats-granulats-sable-gravier-etc--_r_5_a_51.html
- [10] : Labeled Salah, influence des taux élevés des fines calcaires sur le comportement mécanique et rhéologique des mortiers à base du sable de carrière. Mémoire de master, université Mohamed Khider de Biskra. 2018
- [11] : Ghomari F, Bendi-ouis A, sciences des matériaux de construction, université Aboubekr Belkaid, 2007, 2008.
- [12] : F. De Larrard ‘‘ Structures granulaires et formulation de béton ‘’, édition Laboratoire central des ponts et chaussées, 2000.
- [13] : F. Gabrysiak. Matériaux -Chapitre 4 : Les bétons.
- [14] : <https://fra.sika.com/fr/construction/adjuvants-additifs-betons.html>
- [15] : Fiches techniques. Les constituants des bétons et des mortiers. Centre d'information sur le ciment et ses applications. 2005.
- [16] : Guide pour l'emploi des adjuvants en 43 fichiers pratiques : Composition, propriétés, dosage et emploi. SYNAD-collection mémento, 2014.
- [17] : Chebab F, Oukil I, étude de l'influence des différents dosages d'adjuvants sur le comportement mécanique du béton ordinaire. Mémoire de master, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, 2017.
- [18] : Flatt R.J., Houst Y.F., A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. Cement and Concrete Research, Vol. 31, N°. 8, pp. 1169-1176, 2001.
- [19] : Nicolas E, compatibilités et incompatibilité liants cimentaires/superplastifiants, thèse de doctorat, université du Luxembourg. 2010.
- [20] : Berrah F.Z, utilisation des adjuvants superplastifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons, Mémoire de magister, Université Larbi Ben M'hidi Oum EL Bouaghi, 2013.

- [21] : Uchikawa H., Uchida S., Ogawa K., Hanehara S. : Influence of $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ and CaSO_4 on the initial hydration of clinker having different burning degree. Cement and Concrete Research, Vol. 14, No. 5, pp. 645-656, 1984.
- [22] : RICKERT J. : Wechselwirkungen zwischen Zementen und Betonzusatzmitteln. Technisch-wissenschaftliche Zementtagung, Nuremberg, Allemagne, 2005.
- [23] : Technique béton, retardateur de prise, www.technique-beton.fr, 2023
- [24] : Osta René, Connaissances du béton : Matériaux, mise en œuvre et pathologie, décembre 2011.
- [25] : Huynh H.T, la compatibilité ciment-superplastifiant dans les bétons de hautes Performances : Synthèse bibliographique, L.C.P.C N°206, pp.63-73. 1996.
- [26] : Ziane A, Caractérisation rhéologique des polymères à basse et haute température. Mémoire de master, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2015.
- [27] : Huang N, Agnely F, Plate-forme de Rhéologie de l'Institut Galien Paris-Sud.
- [28] : Ounadi B, Simulation numérique d'un écoulement dans un canal de compresseur monoétage, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2011.
- [29] : Elahacene N.E.H, essais et mesures rhéologique pilotes par le Logiciel Rheo3000. Mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2019.
- [30] : wwwps://Openfoam.org ; User Guide version 10 - 7.3 Transport/rheology models. 2022.

Annexe



SPA BISKRIA CIMENT



PRODUCT DATA SHEET

CEM I 42.5R

PORTLAND CEMENT

CEM I 42.5R Portland cement, for high performance concretes with rapid short-term resistance, intended for areas where removal of formwork deadlines are short, it is particularly recommended for concreting in cold weather.

CEM I 42.5R :

Compliant with Algerian Standard (NA442-2013)

APPLICATION AREAS

A cement for all your high strength construction works at a young age, it is also recommended for the following uses :



















- Concrete products which require rapid hardening.
- Concreting in sliding formwork, especially in wintertime.
- Concrete resistant to frost in the presence of de-icing salts.
- Bridge decks.
- Pumped concrete.
- Sprayed concrete.



✓ RECOMMENDED APPLICATIONS

- Reinforced concrete with high resistance.
- Self-consolidating concrete.

🪣 RECOMMENDED FORMULATION

Concrete dosage	cement 	Sand (dry) 0/5 	Gravel (dry) 8/15mm 15/25mm 	Water (liters) 
	50k X1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 25 L
Mortar for bricklaying	cement 	Sand Corrector 0/1mm 	Sand (dry) 0/4mm 	Water (liters) 
	50k X1 	+ X6 	+ X9 	+ 35 L
Finishing mortar	50k X1 	+ X9 	+ X6 	+ 35 L

Note : one Drum = 10 liters

🔍 TECHNICAL CHARACTERISTICS

Chemical analyzes (%)	value
Loss on ignition	2.6 – 3.7
Sulphate content (SO ₃)	2.2 – 2.8
Magnesium Oxide content (MgO)	1.7 – 2.8
Chloride content (Cl ⁻)	0.03 – 0.07
Potential composition of Clinker (%) (According to Bogue)	value
C ₃ S	56 – 66
C ₃ A	5.1 – 7.2
Physical properties	value
Normal consistency (%)	25.8 – 26.4
Hot expansion (mm)	0.25 – 1.0
Setting time (min)	value
Setting start	150 – 190
Setting end	220 – 250
Résistance à la compression	value
2 days (MPa)	20 – 29
28 days (MPa)	42.5 – 52.5



Version : 01/2021

SPA BISKRIA CIMENT
Adress : Djar Belahrache
Branis , Biskra Algeria

Phone : +213 (0) 560 753 424
Fax : +213 (0) 33 558 108
contact@biskriaciment-dz.com
www.biskriaciment-dz.com

UN DEMI SIÈCLE AU SERVICE DE LA CONSTRUCTION.

NA 442/2013

CEM III/A-L 42.5 N

Ciment Portland au Calcaire

Produit disponible chez nos filiales

Société des Ciments de Hadjar Soud
(SCHS, SKIKDA)

Société des Ciments de Ain El Kebira
(SCAEK, Sétif)

Société des Ciments de Ain touda
(SCIMAT, Batna)

Société des Ciments de Sour El Ghazlene
(SCSEG, Bouira)

Société des Ciments de Béni Saf
(SCIBS, Ain Temouchent)


Société des Ciments de Hamma Bouziane
(SCHB, Constantine)

Société des Ciments de l'Algérois
(SCAL, Alger)

Société des Ciments de Saida
(SCIS, Saida)

Société des Ciments de la Mitidja
(SCMI, Blida)

Entreprise des Ciments et Dérivés d'Ech-Cheliff
(ECDE, Chlef)



Nouvel aéroport d'Alger
construit avec le ciment GICA.

Présentation

Le **CEM II/A-L 42.5 N** est un Ciment Portland au Calcaire (**CPC**), certifié selon exigences et les normes en vigueur.

Domaine d'emploi

Le ciment **CEM II/A-L 42.5 N** de GICA est adapté pour les usages suivants :

- Travaux de fondation, souterrains, d'assainissement ;
- Génie civil (ouvrage et routes) ;
- Les bétons armés et non armés, préfabriqués ou précontraints, étuvés et auto étuvés ;
- Travaux de construction (logements, locaux commerciaux et industriels);
- Produits dérivés du ciments.

Recommandations spécifiques et générales

- Pour les travaux sous la pluie, par temps chaud, par grand vent ou par temps de gel utilisé des adjuvants normalisés et appropriés ;
- Les coulées doivent être régulières et continues par couches de faible épaisseur ;
- La hauteur de chute du béton ne peut pas dépasser 1 mètre de hauteur, de façon à éviter toute ségrégation. Au delà de cette hauteur, il est indispensable de prévoir l'utilisation d'une goulotte amenée à hauteur convenable, ou d'une cheminée d'alimentation ;
- Adapter la vibration du béton à sa consistance pour obtenir une compacité optimal sans ségrégation ;
- Veiller au respect des temps de prise lors de la livraison du béton frais.

COMPOSITION

	Clinker	Ajout calcaire	Constituant secondaire
Taux %	(80 à 94) %	Catégorie A (06 à 20) %	(De 0 à 5) %

PACKAGING

Sacs 50kg / Disponible en Vrac

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

	TEMPS DE PRISE	STABILITÉ
TEMPS	≥ 60 minutes	≤ 10 minutes

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Résistance à la compression à 02 J	Résistance à la compression à 28 J
≥ 10.0 N/mm ²	≥ 42.5(N/mm ²) & ≤ 62.5(N/mm ²)

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES

Teneur en sulfates (SO3)	Teneur en chlorures (Cl)
≤ 3.5 %	≤ 0.10 %



Certification



Retrouvez nous sur



Groupes Industriels des Ciments d'Algérie (GICA)
Siège social : Route de Dar El Beida Meftah (W. de Blida), Algérie
Tél/Fax : +213(0) 25 45 61 98 / 213(0) 25 45 62 61
site web : www.gica.dz



Mokaouem Plus

مقاوم بلوس

LAFARGE
Construire
des villes meilleures™

Ciment Portland

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR 3

Mokaouem est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé.

Mokaouem
NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

Mokaouem NA 442 -CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442 v 2013 et la EN 197-1II est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en C3A < 3%.

AVANTAGES PRODUIT



- Tout en étant un ciment de haute performance, **Mokaouem** protège la structure contre les agressions chimiques de l'environnement externe.
- Une meilleure durabilité pour les structures en béton.
- Une faible chaleur d'hydratation.











APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Les fondations et les structures à réaliser dans un milieu agressif
- Les travaux maritimes
- Les stations de dessalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec)  0/5	Gravillons (sec)  8/15mm 15/25mm	Eau (litres) 
Dosage pour béton C25/30	X 1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

Formulation de béton à suivre dans le cas de l'absence d'une étude délivrée par un laboratoire"

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	0,5 à 3 %
Teneur en sulfates (SO3) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0,01 à 0,05

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	> 60
Fin de prise (min)	240 à 400

• Composition minéralogique

	Valeur
Taux d'aluminate C3A	<3.0%

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥10
28 jours (MPa)	≥42.5

• Propriétés physiques

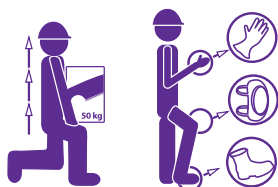
	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤2,0
Chaleur d'hydratation	<270j/g

Ces valeurs sont données à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme absolues

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



Conditionnement:



LAFARGE ALGÉRIE

MasterGlenium SKY 841

Superplastifiant haut réducteur d'eau.

Description

Le MasterGlenium SKY 841 est un superplastifiant haut réducteur d'eau issu du long savoir de Master Builders Solutions en termes de formulation et d'innovation.

Le MasterGlenium SKY 841 a été développé pour optimiser la production du béton prêt à l'emploi où qualité, durabilité, performance, ouvrabilité, faible viscosité et robustesse sont requises.

Particularités du MasterGlenium SKY 841

Le MasterGlenium SKY 841 se différencie des superplastifiants traditionnels par sa facilité d'utilisation notamment pour les bétons fluides et autoplaçants. Cette faible viscosité alliée à une grande robustesse de béton permettent au MasterGlenium SKY 841 d'améliorer considérablement le comportement dynamique et ainsi la mise en oeuvre des bétons tout en optimisant le dosage en liant du béton.

Domaines d'application

Le MasterGlenium SKY 841 est recommandé pour la fabrication de béton plastique à autoplaçant nécessitant un long maintien d'ouvrabilité et des performances mécaniques initiales élevées.

Le MasterGlenium SKY 841 est donc adapté à l'industrie du béton prêt à l'emploi ainsi qu'aux chantiers de Génie-Civil. Le MasterGlenium SKY 841 peut être utilisé pour la réalisation des bétons suivants :

- Béton prêt à l'emploi selon la norme NF EN 206/CN
- Béton pompé
- Béton autoplaçant
- Béton hautes performances et ultra hautes performances
- Béton architectonique

Propriétés

L'excellent effet de dispersion de la chimie des MasterGlenium permet de conserver une consistance S4 ou S5 sur des bétons à faibles rapport E/C pendant plus de 90 minutes sans retard de prise.

Le MasterGlenium SKY 841 offre les avantages suivants :

- Béton de faible viscosité même à rapport E/C très faible
- Long maintien de l'ouvrabilité sans retard de prise préjudiciable
- Bonne réactivité avec les ciments recomposés
- Bonne robustesse vis-à-vis du ressuage et de la ségrégation
- Optimisation des dosages en liant
- Grande plage de dosage possible
- Bonne réactivité avec les granulats concassés
- Amélioration de la durabilité des bétons liés au faible E/C
- Amélioration des parements

Mode d'emploi

L'effet optimal est généralement obtenu par incorporation du MasterGlenium SKY 841 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70% de l'eau de gâchage dans le malaxeur. Toutefois, il est possible d'incorporer le MasterGlenium SKY 841 dans l'eau de gâchage.

Eviter d'ajouter le MasterGlenium SKY 841 directement sur les granulats.

Dosage

Plage normale d'utilisation :

0,05 à 3,0% du poids du ciment soit 0,048 à 2,83 l pour 100 kg de ciment.

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local Master Builders Solutions France.

Compatibilité

Pour une utilisation en synergie avec un autre adjuvant de la gamme Master Builders Solutions, consultez votre Agent local Master Builders Solutions France.

Précautions d'emploi

Le MasterGlenium SKY 841 n'est pas soumis à étiquetage.

MasterGlenium SKY 841

Superplastifiant haut réducteur d'eau.

Conditionnement

Le MasterGlenium SKY 841 est disponible en bidon de 10 L, fût de 210 L, container de 1.000 L et vrac.


Stockage

Le MasterGlenium SKY 841 doit être stocké à une température supérieur à + 5° C.

Durée de vie

Le MasterGlenium SKY 841 a une durée de vie de 12 mois à compter de la date de fabrication.

Caractéristiques

Aspect	Liquide
Couleur	Jaunâtre à brun
Masse volumique à + 20° C	1,06 ± 0,03 g/cm ³
pH	5,5 ± 1,8
Teneur en chlore	< 0,1 %
Extrait sec	26,0 % ± 1,3%
Na ₂ O eq	≤ 2 %
Transport	Non classé
Etiquetage	

Master Builders Solutions France SAS a couvert sa responsabilité civile tant en exploitation qu'après livraison de ses produits par une police d'assurance souscrite auprès de la Compagnie HDI Gerling France. Les garanties de cette police sont complétées par la police "parapluie" responsabilité civile du Groupe souscrite auprès de la société d'assurances HDI Gerling Allemagne.

Master Builders Solutions France SAS

Z.I. Petite Montagne Sud - 10, Rue des Cévennes - 91090 LISSES
Tél. : 01 69 47 50 00 Fax : 01 60 86 06 32 www.master-builders-solutions-fr/fr.com

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci. L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec l'une de nos agences Master Builders Solutions France SAS

Conformément à la réglementation en vigueur, nos Fiches de Données de Sécurité (FDS) sont transmises automatiquement (par courrier postal ou électronique) aux clients livrés. En dehors de cette situation, contacter votre chargé de Clientèle pour tout autre besoin de FDS.