



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم

University Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم الهندسة المدنية

Civil engineering departement



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en génie civil.

Thème :

ELABORATION D'UN BETON A INFILTRATION DE COULIS (SIFCON) A BASE DE 5% ET 7% DE FIBRES D'ACIER

Présenté par :

- ZIANE Ali.
- SADAOUI Kheir-Eddine.

Soutenu le 04/ 06/ 2026 devant le jury composé de :

Président : Mr BELARIBI Omar
Examinatrice : Mme MOSTEFA Fouzia
Encadrante : Mme BELAS Nadia

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

*Tous d'abord, on remercie **ALLAH TAALA** de nous avoir donné du courage et de la patience pour réaliser ce modeste travail.*

*Au moment d'exprimer notre reconnaissance envers les personnes qui ont, de près ou loin, contribué à la réalisation de ce travail, nous souhaitons tout d'abord remercier M^{me} **BELAS NADIA** qui a dirigé ce mémoire. Elle a su guider nos choix, nous faire profiter de ses connaissances et nous accorder sa confiance. La simplicité et la franchise de son contact ont largement contribué à rendre ce semestre agréable.*

*Notre sincère gratitude pour Mr. **BELARIBI OMAR** et M^{me} **MOSTEFA Fouzia** pour avoir évalué ce travail.*

*On remercie chaleureusement toute l'équipe du département de Génie Civil de l'université **ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM**.*

On a évidemment une pensée pour toutes celles et ceux qui nous ont permis de mener à bien cette mémoire.

Merci aussi à tous nos amis et nos collègues.

Merci

Dédicaces

On voudrait dédier ce travail à :

Nos chers parents pour lesquels les mots ne suffiront pas pour témoigner toute notre gratitude pour leur entière disponibilité, leur assistance et leur dévouement tout au long de nos cursus et la réalisation de ce travail, à toutes nos familles pour leur aide.

Tous les étudiants de la faculté des sciences et technologie de l'université de Mostaganem, et à nos camarades de promotion de Matériaux en Génie Civil.

ZIANE Ali

SADAOUI Kheir-Eddine

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

RESUME

ABSTRACT

ملخص

INTRODUCTION GEGERALE1

PARTIE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE1 :GENERALITES SUR LE COULIS DE CIMENT

I.1. INTRODUCTION 5

I.2. COULIS DE CIMENT 7

I.2.1. Le ciment..... 7

I.2.2. L'eau de gâchage 8

I.2.3. Les adjuvants..... 8

I.3. LE CHOIX DES COULIS 8

I.4. LE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU COULIS 8

I.4.1. Seuil de cisaillement 9

I.4.2. Viscosité..... 10

I.4.3. Thixotropie 10

I.4.4. Décantation 11

I.5.CONCLUSION 11

CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES FIBRES

II.1. INTRODUCTION 13

II.3. UTILISATION DES FIBRES DANS LE BETON	14
II.3.1. Amélioration des caractéristiques mécaniques	14
II.3.2. Contrôle de la fissuration de retrait.....	15
II.3.3. Avantages du béton fibré	15
II.3.4. Applications.....	16
II.4.1. Fibres synthétiques	16
<i>II.4.1.1. Les microfibres synthétiques</i>	<i>17</i>
<i>II.4.1.2. Les macrofibres synthétiques</i>	<i>17</i>
II.4.2. Fibres métalliques.....	18
II.5. CONCLUSION.....	19
 CHAPITRE 3 :REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SIFCON	
III.1. INTRODUCTION	21
III.2. COMPOSITION DU SIFCON.....	22
III.2.1. Les fibres métalliques	22
III.2.2. Matrice de SIFCON.....	23
III.2.3. Les proportions du mélange.....	24
III.3. PREPARATION	26
III.4. RESULTATS DES RECHERCHES EFFECTUEES SUR LE SIFCON.....	27
III.4.1. Etude de Mustafa Faisal Abbas et al [30]	27
III.4.2. Etude de M.VIJAYAKUMAR et al [31]	28
III.4.3. Etude de Aliyaa M. Alsheameri et al [32]	31
III.5. APPLICATIONS DU SIFCON	32
III.6. STRUCTURES RESISTANTES AUX TREMBLEMENTS DE TERRE	32
III.7. REPARATION ET MODERNISATION DE COMPOSANTS STRUCTURELS	33

III.8. STRUCTURES RESISTANTES AUX EXPLOSIONS	34
III.9. AUTRE APPLICATION	34
III.10. CONCLUSION	35
PARTI II : ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTATS	
CHAPITRE1 : MATERIAUX UTILISES	
I.1. INTRODUCTION	38
I.2. LE CIMENT.....	38
I.3. L'ADJUVANT	40
I.4. EAU	41
I.5. LES FIBRES	41
I.6. CONCLUSION	42
CHAPITRE 2 : METHODES EXPERIMENTALES	
II.1. INTRODUCTION	44
II.2.1. Essais sur le ciment anhydre	44
<i>II.2.1.1. Masse volumique absolue</i>	<i>44</i>
<i>II.2.1.2. Masse volumique apparente</i>	<i>45</i>
<i>II.2.1.3. Mesure de la finesse.....</i>	<i>46</i>
II.2.2. Essai sur les fibres	48
<i>II.2.2.1. Mesure de la masse volumique.....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
II.3.1. Essais sur pates normalisées	49
<i>II.3.1.1. Essai de consistance.....</i>	<i>49</i>
<i>II.3.1.2. Essais de prise</i>	<i>51</i>
II.4. METHODES DU COULIS (CONE DE MARSH) NF P 18-358	53
II.4.1. Objectif de l'essai.....	53
II.4.2. Principe de l'essai	54
II.4.3. Conduite de l'essai.....	54

II.4.4. Equipement nécessaire utilisé.....	55
II.4.4.1. Malaxeur	55
II.4.4.2. Cône de Marsh	56
II.4.4.3. Chronomètre	57
II.4.5. Composition des coulis de ciment	58
II.4.5.1. Malaxage du coulis	58
II.4.5.2. Mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh	60
II.5. METHODES DE PREPARATION DU BETON (SIFCON).....	61
II.5.1. Matériaux et proportions de mélange.....	61
II.5.2. Confection du béton	62
II.5.3. Conservation des éprouvettes	64
II.5.4. Conservation des éprouvettes dans l'eau	64
II.5.5. Résistances mécaniques des bétons.....	65
II.5.5.1. Mesure des résistances à la compression et à la traction EN 196-1	65
II.5.6. Propriété physique de béton (Essai de mesure de la masse volumique)	67
II.6. CONCLUSION.....	68
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET ANALYSE	
III.1. INTRODUCTION	69
III.2. RESULTATS DE COULIS	69
III.2.1. La consistance.....	69
III.2.2. Temps de prise.....	70
III.2.3. La masse volumique des fibres	70
III.2.4. Analyse des propriétés des coulis de ciment	71
III.2.4.1. L'influence du Dosage en Superplastifiant sur la fluidité du coulis à 5 et 60 mn	71
III.2.4.2. Perte de fluidité.....	72
III.3. PROPRIETES PHYSICO - MECANQUES DU SIFCON	73
III.3.1. La masse volumique de SIFCON.....	73
III.3.2. Performances mécaniques	74

<i>III.2.3.1. SIFCON 5%</i>	75
<i>II.2.3.2. SIFCON 7%</i>	77
<i>III.2.3.3. Comparaison des deux bétons</i>	79
III.3. CONCLUSION	81
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	1

Liste des figures

Partie I

Chapitre 1

Figure I.1.1:Coulis d'ancrage et d'injection [3].....	3
Figure I.1.2 : La projection de coulis de ciment [3].....	4
Figure I.1.3 : L'injection de coulis de ciment [3].....	4

Chapitre 2

Figure I.2.1 : Les fibres de verre et fibres métalliques [16].....	11
Figure I.2.2 : Texture d'un béton fibré [18].....	12
Figure I.2.3 : microfibres synthétiques [18].....	15
Figure I.2.4 : macrofibres synthétiques [18].....	15
Figure I.2.5: Géométrie des fibres métalliques [17].....	16
Figure I.2.6 : Fibres métalliques [18]	17

Chapitre 3

Figure I.3.1: Géométrie des fibres métalliques [19].....	21
Figure I.3.2 : Placement à la main des fibres d'acier dans un moule [24].....	24
Figure I.3.3 : Infiltration de coulis aidée par des vibrations externes [24].....	24
Figure I.3.4 : Résistance à la compression [31].....	27
Figure I.3.5 : la résistance à la traction par fendage [31].....	28
Figure I.3.4: Représentation schématique des joints SIFCON dans le système structural [22].....	30

Partie II

Chapitre 1

Figure II.1.1 : L'adjuvant utilis.....	38
Figure II.1.2 : Type de fibres utilisées.....	39

Chapitre 2

Figure II.2.1 : Procédure de mesure de la masse volumique absolue du ciment.....	42
Figure II.2.2 : Procédure de mesure de la masse volumique apparente du ciment.....	43
Figure II.2.3 : L'appareil de Blaine.....	44
Figure II.2.4 : Méthode de l'éprouvette graduée.....	45
Figure II.2.5 : Mesure de la masse volumique des fibres.....	46

Figure II.2.6 : Appareil de VICAT muni de sa sonde deconsistance.....	46
Figure II.2.7 : Appareil de Vicat muni d'aiguille.....	49
Figure II.2.8 : Cône de Marsh utilisé dans la méthode du couli.....	50
Figure II.2.9 : Ecoulement de coulis.....	51
Figure II.2.10 : Malaxeur normalisé.....	52
Figure II.2.11 : Cône de Marsh.....	53
Figure II.2.12 : Chronomètre.....	53
Figure II.2.13 : Préparation du coulis.....	55
Figure II.2.14 : Remplissage du cône.....	56
Figure II.2.15 : Mode opératoire pour la mesure de fluidité du coulis.....	57
Figure II.2.16: moule normalisé.....	59
Figure II.2.17 : Les étapes de préparation du mélange.....	59
Figure II.2.18 : Le démoulage des éprouvettes.....	60
Figure II.2.19 : conservation des éprouvettes dans un bac rempli d'eau.....	61
Figure II.2.20: machine de compression utilisée.....	62
Figure II.2.21 : Dispositif de traction par flexion.....	63
Figure II.2.22 : Les pesées des éprouvettes.....	63

Chapitre 3

Figure II.3.1 : Evaluation de temps de prise du ciment CEM II.....	67
Figure II.3.2 : Variation des temps d'écoulement à 5 et 60 minutes pour les coulis.....	69
Figure II.3.3 : Perte de fluidité pour les coulis.....	70
Figure II.3.4 : la masse volumique de SIFCON.....	71
Figure II.3.5: Processus d'écrasement des éprouvettes dans les presses.....	71
Figure II.3.6 : Evolution des résistances à la traction du SIFCON 5%.....	72
Figure II.3.7 : Aspect des éprouvettes destinées à l'essai de traction	73
Figure II.3.8 : Evolution des résistances à la compression du SIFCON 5%	73
Figure II.3.9 : Résistances à la traction du SIFCON 7%	74
Figure II.3.10 : Résistances à la compression du SIFCON 7%	74
Figure II.3.11: Aspect des éprouvettes destinées à l'essai de compression.....	75
Figure II.3.12 : Comparaison des résistances à la compression entre les deux pourcentages..	76
Figure II.3.13 : Comparaison des résistances à la traction entre les deux pourcentages.....	76

Liste des tableaux

Parti I

Chapitre 3

Tableau I.3.1 : Modèles de mélanges de SIFCON tirés de la littérature (Par rapport au poids du ciment).....	22
Tableau I.3.2 : Constituants des mélanges de béton préparés, en kg/m ³ [30].....	24
Tableau I.3.3 : Propriétés à l'état durci des mélanges préparés [30].....	26
Tableau I.3.4 : Proportion de mélange du SIFCON [31].....	26
Tableau I.3.5 : Résultats des essais du SIFCON à l'état durci [32].....	29

Partie II

Chapitre 1

Tableau II.1.1 : Composition chimique du ciment utilisé [35].....	35
Tableau II.1.2 : Composition minéralogique du clinker.....	36
Tableau II.1.3 : Caractéristiques physiques du CPJ CEM II 42,5.....	37

Chapitre 2

Tableau II.2.1 : Composition des coulis.....	54
Tableau II.2.2 : Compositions de SIFCON kg/m ³	58

Chapitre 3

Tableau II.3.1 : Résultats de consistance.....	66
Tableau II.3.2 : Résultats des temps de prise.....	67
Tableau II.3.3 : Dosages des constituants pour 1L.....	68
Tableau II.3.3 : Les résultats obtenus de temps d'écoulement de coulis à 5 et à 60 min.....	69
Tableau II.3.4 : Résultats de la perte de fluidité des coulis.....	70
Tableau II.3.5 : la masse volumique de SIFCON.....	71
Tableau II.3.6 : Résistances à la compression et à la traction.....	72
Tableau II.3.7 : Résistances à la compression et à la traction.....	73

RESUME

Le béton est un matériau composite largement utilisé dans l'industrie de la construction en raison de sa résistance et de sa durabilité. La construction de ponts à grande portée, d'immeubles de grande hauteur, de structures en mer exige des bétons aux propriétés de plus en plus améliorées, notamment en termes de résistance, de rigidité, de ténacité et de ductilité. Ils se distinguent fondamentalement du béton conventionnel. Parmi ces bétons exceptionnels on distingue le SIFCON (béton fibré à infiltration de coulis) qui possède une résistance élevée ainsi qu'une grande ductilité grâce à sa forte résistance à la traction. L'objectif de ce projet est d'élaborer ce nouveau béton à base de coulis et de fibres : un SIFCON 5% et un SIFCON 7% incorporant 5% et 7% de fibres d'acier respectivement. Les résultats ont montré que le SIFCON, grâce à sa forte concentration en fibres, démontre des caractéristiques mécaniques (compression et traction) supérieures en termes de résistance et de ductilité.

Mots clés : Coulis – Fibres – SIFCON – Résistance à la compression – Résistance à la traction

ABSTRACT

Concrete is a composite material widely used in the construction industry due to its strength and durability. The construction of large-span bridges, high-rise buildings, and offshore structures requires concrete with increasingly improved properties, particularly in terms of strength, rigidity, toughness, and ductility. They are fundamentally different from conventional concrete. Among these exceptional concretes, we can distinguish SIFCON (Slurry Infiltrated of Fibers Concrete), which has high strength as well as great ductility thanks to its high tensile strength. The objective of this project is to develop this new concrete based on a slurry and fibers base: a 5% SIFCON and a 7% SIFCON incorporating 5% and 7% of steel fibers respectively. The results showed that SIFCON, thanks to its high fiber concentration, exhibits superior mechanical properties (compression and tension) in terms of strength and ductility.

Keywords: Slurry - Fibers - SIFCON – Compressive strength – Tensile strength

ملخص

الخرسانة هي مادة مركبة تستخدم على نطاق واسع في البناء بسبب قوتها ومتانتها، يتطلب بناء الجسور ذات الامتدادات الكبيرة والمباني الشاهقة والهياكل البحرية خرسانة ذات خصائص متطورة بشكل متزايد، لا سيما من حيث القوة والصلابة والمتانة والمرونة وهي تختلف اختلافاً جوهرياً عن الخرسانة التقليدية.

من بين هذه الأنواع الاستثنائية من الخرسانات يوجد "SIFCON" (الخرسانة الليفية ذات التسلل بالملاط) التي تتمتع بمقاومة عالية بالإضافة إلى ليونة كبيرة بفضل مقاومتها العالية للشد.

الهدف من هذا المشروع هو تطوير هذه الخرسانة الجديدة القائمة على الملاط والألياف : 5% SIFCON و SIFCON 7% تتضمن 5% و 7% من الألياف الفولاذية على التوالي. أظهرت النتائج أن SIFCON ذات التركيز العالي يتمتع بخصائص ميكانيكية فائقة (الانضغاط والشد) من حيث القوة والليونة.

الكلمات المفتاحية : الجص ، الألياف الفولاذية، مقاومة الضغط ، مقاومة الشد.

GENERALE**INTRODUCTION GENERALE**

Le béton est un matériau très utile pour de nombreuses créations innovantes. Il peut prendre différentes formes et offre une résistance à la compression remarquable, une rigidité élevée, une conductivité thermique et électrique faible, ainsi qu'une faible combustibilité et toxicité.

Cependant, le béton a deux limites : il est fragile et a une mauvaise résistance à la traction. Mais grâce aux progrès récents dans la fabrication de matériaux composites renforcés de fibres, nous pouvons surmonter ces limites.

Malgré son utilisation courante dans la construction, le béton a une caractéristique qui peut mettre en danger la sécurité des structures : il a tendance à se fissurer.

Pour résoudre ce problème, des méthodes ont été développées, comme l'armement du béton avec des barres d'acier (le béton armé traditionnel) ou la précontrainte du béton pour éviter les forces de traction.

Une nouvelle catégorie de béton appelée SIFCON (Béton à Infiltration de Coulis) a été créée. Il s'agit d'un matériau composite à base de ciment renforcé par des fibres, qui offre un comportement écouissant et très ductile en traction uniaxiale, tout en étant robuste en compression et en traction. Le SIFCON est conçu pour être utilisé dans la création de structures ou d'éléments structuraux sans autres renforts que les fibres métalliques.

Le SIFCON est utilisé pour des applications spécifiques comme le béton coulé et le béton préfabriqué conçu pour des profils ou des structures résistant fortement aux impacts et aux explosions. Grâce à sa grande résistance à la flexion et à la compression, associée à une ductilité élevée, le SIFCON a servi à créer des structures destinées au stockage de différents types de munitions.

La procédure de fabrication du SIFCON implique le positionnement des fibres dans le moule ou le coffrage, suivi de l'application du mélange de ciment. Cette technique ne nécessite pas l'emploi de granulats fins ou grossiers.

Le bénéfice de cette technique est qu'elle autorise l'emploi d'un pourcentage élevé de fibres, pouvant atteindre 20% alors que dans un béton fibré conventionnel (BFC), où les fibres sont mélangées avec d'autres composants du béton, ce pourcentage est limité à seulement 2%

GENERALE

environ pour des raisons pratiques de maniabilité [1]. L'introduction du coulis de ciment nécessite l'emploi de la vibration externe.

Jusqu'au jour d'aujourd'hui aucune recherche sur le SIFCON n'a été entreprise en Algérie mis à part celle effectuée par les étudiants en masters structure en 2019 [1] en collaboration avec COSIDER.

Ce projet novateur représente une continuité de cette étude et porte sur la conception d'un SIFCON à partir de 5% et 7% de fibres métalliques et l'étude de son comportement mécanique.

Cette recherche est divisée en deux parties :

La première partie consiste en une revue de littérature divisée en trois chapitres. Le premier chapitre discute des diverses méthodes d'application et des composants du coulis. Le deuxième chapitre expose l'emploi des fibres dans le béton, en détaillant les différentes sortes de fibres ainsi que leurs caractéristiques. Le troisième chapitre présente une revue sur le SIFCON, en détaillant sa composition, ses usages, ses modes d'action et sa caractérisation.

La seconde partie se concentre sur l'identification et la caractérisation des divers matériaux composant le SIFCON, ainsi que la description du protocole expérimental et l'analyse des résultats obtenus. Elle englobe trois chapitres :

Le premier chapitre se focalise sur les conclusions des tests de caractérisation des matériaux utilisés. Les différentes investigations expérimentales menées sont détaillées dans le deuxième chapitre. Les résultats relatifs à la caractérisation du coulis et à l'étude des propriétés mécaniques du béton durci font l'objet du troisième chapitre.

Enfin, nous présentons une synthèse globale de notre étude ainsi que des pistes potentielles pour la poursuite de ce travail.

Partie I :

Etude Bibliographique

Chapitre1 :

Généralités sur le coulis de ciment

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE COULIS DE CIMENT

I.1. INTRODUCTION

Le coulis de ciment est une suspension fluide de liant hydraulique utilisée pour remplir des vides, injecter les sols et assurer étanchéité et renforcement (Figure I.1.1). Sa performance dépend de sa composition et de ses propriétés rhéologiques (viscosité, seuil de cisaillement, stabilité) [2].



Figure I.1.1: Coulis d'ancrage et d'injection [3]

Il existe deux techniques particulières de mise en œuvre qui intéressent de nombreuses applications [4] :

La projection

Fabriqués sur chantier ou plus généralement préposés, les mortiers projetés comportent, outre le liant et le sable habituels, des adjuvants spécifiques améliorant l'adhérence, des charges (silice, carbonate...), et parfois des fibres (verre, polypropylène, acier). Projeté à l'aide de machines le plus souvent à air comprimé, le mortier est plus compact, adhère mieux au support et se prête bien à son application sur des parties d'ouvrages difficiles d'accès et de forme irrégulière (Figure I.1.2). La suppression de manipulations délicates et pénibles, ainsi que les

gains de productivité, expliquent le succès du mortier projeté dans de nombreuses applications :

- Enduits monocouches, enduits isolants ;
- Revêtements de voûtes, en galeries, consolidation de talus ;
- Travaux de réparation, etc....



Figure I.1.2 : La projection de coulis de ciment [3]

L'injection

L'injection de mortier n'intéresse que certains types de travaux où les cavités à remplir sont suffisamment larges. Il est nécessaire que le diamètre maximum des grains de sable les plus gros ne dépasse pas $\frac{1}{5}$ des vides les plus fins à remplir. S'il n'en était pas ainsi, il faudrait utiliser des coulis d'injection. Comme dans le cas des coulis de ciment, le mortier d'injection doit être constitué de façon à être le plus « injectable » possible : grande fluidité pour un ressuage modéré (et, partant, une bonne stabilité, peu de ségrégation). Les applications de l'injection sont essentiellement le remplissage de cavités, gaines, enveloppes diverses, ou plus généralement les vides d'accès difficile (Figure I.1.3). L'injection est généralement pratiquée pour certains travaux sous l'eau, avec des formules de mortier étudiées pour éviter le délavage.

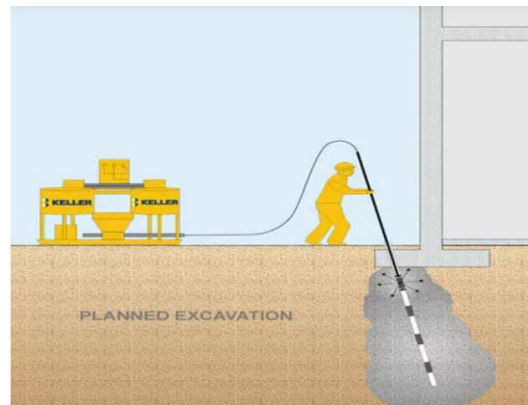


Figure I.1.3 : L'injection de coulis de ciment [3]

I.2. COULIS DE CIMENT

Le coulis de ciment est un mélange fluide à base de ciment + eau, parfois fines minérales (cendres volantes, laitiers, fumées de silice, microfines), adjuvants chimiques (superplastifiants, agents de viscosité, accélérateurs/retardateurs) [5].

I.2.1. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique constitué de poudres fines qui, lorsqu'il est mélangé à de l'eau, forme une pâte capable de prendre et de durcir progressivement. Il existe différents types de ciment, notamment les ciments Portland sans agent CPA, les ciments Portland composés et les ciments de haut-fourneau [6].

La normalisation européenne retient cinq catégories de ciments utilisables dans des bétons de structure [6] :

- Les ciments Portland sans agent (CPA – CEM I), qui contient au moins 95% de clinker. Le pourcentage restant est appelé constituant secondaire.
- Les ciments Portland composés (CPJ – CEM II/A ou B), dont la teneur en addition minérale est de 6 à 20 % pour la sous-catégorie A, et de 21 à 35 % pour la sous-catégorie B.
- Les ciments de haut-fourneau (CHF – CEM III/A, B ou C), dont la teneur en laitier respective est comprise dans les intervalles suivants : [36, 65 %], [66, 80 %], [81, 95 %].

- Les ciments pouzzolaniques (CPZ – CEM IV/A ou B), qui contiennent des pouzzolanes à hauteur de 10 à 35 % pour la catégorie A, et 36 à 55 % pour la catégorie B.
- Les ciments au laitier et aux cendres (CLC – CEM V/A ou B), comprenant un mélange des deux types d'additions dans des proportions de 18 à 30 %, ou de 31 à 50 %, respectivement.

I.2.2. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est utilisée pour hydrater le ciment et fluidifier la pâte. L'eau potable convient pour la confection des pâtes de ciment, mais il est possible d'utiliser d'autres types d'eau si elles répondent aux prescriptions de la norme EN 1008 [7].

Pour les essais de laboratoire, les normes demandent d'utiliser de l'eau distillée en ce qui concerne les essais de référence (ceux qui permettent de vérifier la conformité des matériaux et des appareillages aux normes) et de l'eau potable pour les autres essais [7].

I.2.3. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques solubles dans l'eau qui sont ajoutés aux matériaux cimentaires pour améliorer certaines de leurs propriétés. Ils sont définis par la norme EN 934-2 [8].

I.3. LE CHOIX DES COULIS

Le choix d'un coulis dépend d'abord de l'usage (étanchéité, consolidation, réparation), du support (sol, roche, béton, maçonnerie) et des contraintes de mise en œuvre (injectabilité, durabilité, environnement). Les travaux recensés proposent surtout des critères de formulation et de performance pour guider ce choix [2].

I.4. LE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU COULIS

Le comportement rhéologique décrit comment le coulis s'écoule sous contrainte. Pour le coulis, cela conditionne directement l'injectabilité, la distance de pénétration, la résistance au lessivage et, l'efficacité du traitement de sol ou de fissures.

Deux critères limitent la pénétration des coulis dans un terrain [9] :

- Les grains des coulis ne peuvent pas pénétrer les fissures s'ils sont de taille supérieure à celle des interstices du milieu
- La pénétration du milieu est physiquement possible, mais elle s'effectue à vitesse faible à cause des caractéristiques rhéologiques du coulis.

Les paramètres clés de la rhéologie de coulis sont [10] :

- Viscosité plastique et contrainte de seuil (yield stress) sont les paramètres centraux des coulis cimentaires.
- La plupart des coulis se comportent comme des fluides de Bingham (viscoplastiques avec seuil) ; pour des suspensions plus concentrées, des modèles type Herschel–Bulkley ou Bingham modifié décrivent mieux les courbes d'écoulement.
- Beaucoup de coulis présentent une thixotropie (viscosité qui augmente au repos et diminue sous cisaillement), utile pour combler de grands vides tout en restant pompable.

I.4.1. Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est la valeur minimale de contrainte qu'il faut appliquer à un fluide ou une suspension pour qu'il commence à s'écouler. Il est influencé par le type et la teneur en liant, ainsi que par les adjuvants utilisés. [2].

Ce qui fait varier le seuil de cisaillement [11] :

Type et teneur en liant

- Dans des remblais cimentés en pâte, l'augmentation de la teneur en liant augmente nettement le seuil de cisaillement et la viscosité, et la valeur dépend aussi du type de liant (Portland pur contre mélange ciment-laitier).
- Pour des ciments sulfoalumineux, la fumée de silice réduit la viscosité maximale mais fait augmenter le seuil, tandis que cendres volantes et laitier peuvent compenser cette hausse.

Superplastifiants et adjuvants de viscosité

- Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique de coulis à haute performance sont très sensibles au type et dosage de superplastifiant et d'agent viscosant; les mélanges très pseudoplastiques présentent souvent un faible seuil mais un comportement fortement non linéaire.

- Des superplastifiants naphthalène ou mélamine modifient fortement la viscosité plastique et le seuil, en fonction du type de ciment et de la concentration en ciment.
- D'autres superplastifiants (polyacrylate, lignosulfonate, mélamine) peuvent entraîner cisaillement épaississant ou effets élastiques selon le dosage, ce qui affecte indirectement la détermination du seuil.

I.4.2. Viscosité

La viscosité contrôle l'écoulement, l'injectabilité et la stabilité des coulis et pâtes cimentaires. Elle dépend surtout de la fraction solide, de la dispersion des particules et des adjuvants.

La viscosité du coulis peut être évaluée par deux méthodes de mesure [12]:

- Le temps d'écoulement au cône (s) : il caractérise l'aptitude à l'écoulement des coulis.
- Le viscosimètre à cylindres coaxiaux (Pa)

Suivant la consistance des coulis, l'un ou l'autre des diamètres d'ajustage suivants peut être utilisé :

- Ajustage de 4,75mm (cône de Marsh) pour les coulis fluides.
- Ajustage de (8 mm, 10 mm, 14 mm) coulis chargés.

I.4.3. Thixotropie

La thixotropie est un phénomène qui se produit lorsque le coulis est soumis à une contrainte de cisaillement suffisamment élevée, ce qui entraîne une diminution de la viscosité. Lorsque la contrainte de cisaillement diminue, les particules du coulis ont tendance à restructurer l'état initial, ce qui entraîne une augmentation de la viscosité. [13].

Néanmoins, lorsque la contrainte de cisaillement appliquée diminue, les nouveaux floccs peuvent être reformés entre les grains isolés ou avec les floccs existants par la force d'attraction entre les grains ou les floccs. Les grains de coulis ont tendance à restructurer l'état initial. Ceci correspond au fait que la viscosité du coulis augmente. Ce phénomène est appelé thixotropie [13].

I.4.4. Décantation

On définit la décantation du coulis par la remontée d'eau qui se produit à la surface d'une suspension, à la suite de la sédimentation de ses particules. Le rapport E/C influence grandement la stabilité des coulis : plus il est élevé, plus la sédimentation est importante [14].

Les suspensions granulaires présentent une tendance à la décantation. Il en résulte un tassement et une remontée d'eau à la surface. Ce phénomène est lié au poids volumique des grains et provoque une hétérogénéité des caractéristiques mécaniques dans la masse du coulis. L'ajout d'un matériau stabilisant comme la bentonite dans la suspension du coulis permet de supprimer la décantation des grains de ciments [14].

La décantation s'exprime en % par :

$$\text{Décantation (\%)} = \frac{V}{V_0} 100\%$$

Où :

- V : volume d'eau de ressuée
- V₀ : volume initial de coulis

Un coulis est dit stable s'il reste homogène, c'est-à-dire si on observe l'absence de sédimentation et une recyage faible. Un coulis stable doit avoir une décantation inférieure à 5% à 3 heures, cette valeur peut être limitée à 1 heure pour certaines applications telles que le clavage des ouvrages [14].

I.5.CONCLUSION

Le coulis de ciment est généralement un fluide viscoplastique thixotrope, caractérisé par viscosité plastique, contrainte de seuil et parfois indice d'écoulement. Ces paramètres dépendent fortement de la teneur en eau, de la finesse et du type de ciment, des additions minérales (bentonite, cendres volantes, nano-silice, laitier...) et des adjuvants polymères, ainsi que de la température. Maîtriser ce comportement rhéologique est indispensable pour concevoir des coulis injectables, stables et résistants au lessivage, adaptés à chaque contexte de fixation [15].

Chapitre 2 :

Généralités sur les fibres

CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES FIBRES

II.1. INTRODUCTION

Les fibres jouent un rôle clé dans plein de secteurs scientifiques et industriels, comme le génie civil, l'industrie textile ou encore les matériaux composites. Leur popularité a explosé parce qu'elles peuvent vraiment renforcer et améliorer les caractéristiques des matériaux : leur résistance, leur flexibilité et leur durabilité. Par exemple, dans le béton, ajouter des fibres aide à réduire la formation de fissures et à rendre le matériau plus solide et plus durable sur le long terme [16].

II.2. LES FIBRES

Les fibres sont des éléments discontinus, de nature variable, généralement caractérisés par une géométrie sensiblement cylindrique, avec des diamètres et des longueurs variables. Elles sont incorporées dans une matrice selon une distribution aléatoire ou suivant une orientation préférentielle, en fonction des exigences de performance. Le terme “fibre” est également employé pour désigner le constituant élémentaire des structures textiles. Les fibres se différencient selon plusieurs critères, notamment leur origine, leur forme, leurs dimensions et leurs propriétés mécaniques. Dans le cadre des applications en matériaux composites, le choix du type de fibre est très important. Il doit être effectué en tenant compte de la compatibilité entre la fibre et la matrice, ainsi que des performances attendues du composite. Il existe une grande diversité de fibres sur le marché, telles que les fibres de verre ou métalliques [16].



Figure I.2.1 : Les fibres de verre et fibres métalliques [16]

II.3. UTILISATION DES FIBRES DANS LE BETON

Les fibres de différentes compositions incorporées au béton ont pour effet d'augmenter la résistance résiduelle du béton. Dans certains cas, l'utilisation de fibres permet de renforcer la structure. En général, les fibres permettent une meilleure répartition des contraintes mécaniques. Ce chapitre présente les types d'ouvrages en béton fibré, les propriétés physiques majeures liées à l'utilisation de fibres et les avantages du béton fibré (Figure I.2.2) [17].



Figure I.2.2 : Texture d'un béton fibré [18]

II.3.1. Amélioration des caractéristiques mécaniques

L'utilisation de fibres augmente la ductilité du béton, c'est-à-dire ses caractéristiques en post fissuration. De plus, l'utilisation de fibres peut apporter une amélioration en flexion, en tension, en torsion et en cisaillement ainsi qu'à la résistance aux impacts et à la fatigue. Un béton fibré continue donc à supporter des charges après la formation de fissures [17].

L'augmentation de la capacité en flexion est obtenue grâce à l'augmentation de la résistance résiduelle par l'utilisation des fibres. Cette propriété est aussi fonction de la nature, de la quantité et de l'efficacité des fibres utilisées. Il est important de se rappeler que la distribution uniforme des fibres dans le mélange est la condition essentielle pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré. Il faut combiner tout apport de fibres dans le béton à des techniques d'insertion des fibres permettant d'éviter la formation « d'oursins » [17].

II.3.2. Contrôle de la fissuration de retrait

Selon l'efficacité du type de fibres utilisé, il est possible de mieux contrôler et de diminuer le phénomène de fissuration et d'augmenter les propriétés mécaniques en post fissuration. Pour optimiser le contrôle de la fissuration, les fibres doivent être distribuées de manière homogène dans le béton tout en ayant un dosage adéquat. L'utilisation de fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique. Pour le béton durci, le retrait de séchage reste présent, mais les fissures sont mieux contrôlées. Les fissures sont donc plus minces, moins longues et mieux distribuées sur la surface totale de l'ouvrage. Elles peuvent même s'avérer invisibles à l'œil nu [17].

II.3.3. Avantages du béton fibré

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique [17].

Aspect technique :

L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé. Les principaux avantages techniques sont :

- ❖ Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton.
- ❖ Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post fissuration (résistance résiduelle).
- ❖ Une énergie d'absorption élevée.
- ❖ Une résistance aux impacts élevée.
- ❖ Une résistance à la fatigue élevée.
- ❖ Une augmentation de la résistance en cisaillement.

Aspect économique :

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- ❖ Une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction.
- ❖ Du coût de mise en place et du temps de construction.
- ❖ Une optimisation du dimensionnement.

II.3.4. Applications

La recherche et le développement ont permis d'appliquer un concept de renforcement structural à différents types d'ouvrages en béton. De par leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications où il faut réduire les risques de fissuration, augmenter la résistance aux impacts et tirer parti de l'amélioration de la performance du béton pour optimiser le dimensionnement des ouvrages.

Le béton fibré est utilisable dans tous les domaines du génie civil, aussi bien dans les constructions industrielles, commerciales et institutionnelles que résidentielles [17].

II.4. TYPES DES FIBRES ET PROPRIETES

Il existe sur le marché diverses catégories de fibres pouvant être incorporées au béton. Voici les quatre classes de fibres existantes [19] :

- ❖ Synthétique (acrylique, aramide, carbone, nylon, polyester, polyéthylène et polypropylène).
- ❖ Naturelle (bagasse, noix de coco, jute, maguey, banane, palmier et bambou).
- ❖ Métallique (inoxydable, galvanisé, fil étiré à froid, tôle découpée, extrusion de matière fondue).
- ❖ Verre (sodocalcique, borosilicaté, Cem-Fil et NEG (négative))

II.4.1. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques proviennent des polymères organiques et sont le résultat de recherches et des développements de l'industrie pétrochimique et du textile. Les fibres reconnues comme les plus résistantes sont : les polyoléfines, les polypropylènes, les polyéthylènes, le nylon et le carbone. Les fibres synthétiques s'incorporent à la pâte de ciment sans provoquer de réaction chimique et sans se corroder. De plus, l'allongement à la rupture des fibres synthétiques, qui est de 15 à 20 %, favorise la ductilité du béton. Les fibres synthétiques tirées des matières plastiques sont, par contre, peu résistantes au feu. La température de fusion ou température à laquelle les fibres deviennent très molles et perdent leurs propriétés est d'environ 160°C.

L'appendice H de la norme CSA A23.1 classe les fibres synthétiques en deux catégories selon leur dimension : les microfibres et les microfibres synthétiques [17].

II.4.1.1. Les microfibres synthétiques

La classification des microfibres synthétiques s'effectue à partir de la dimension et du poids de la fibre, conformément à l'industrie du textile. Le diamètre ou le diamètre équivalent doit être converti en denier. Les microfibres synthétiques sont en forme de mono filament très fin ou fibrillé (figure I.2.3). Leur longueur varie de 0,8 à 50 mm et leur diamètre est inférieur à 0,2 mm. Les microfibres synthétiques sont utilisées pour diminuer le retrait plastique. L'amélioration des propriétés mécaniques par l'utilisation de microfibres synthétiques est proportionnelle à leur taux d'addition et à leur efficacité. De plus, ces fibres apportent une augmentation de la ténacité du béton et, par le fait même, elles améliorent son comportement en post fissuration [17].



Figure I.2.3 : microfibres synthétiques [18]

II.4.1.2. Les macrofibres synthétiques

Ces fibres sont en forme de filaments grossiers (figure I.2.4). Leur longueur varie de 25 à 65 mm et leur diamètre équivalent est de 0,2 à 1,2 mm. L'utilisation de ce type de fibre permet une meilleure résistance aux impacts et à la fatigue et améliore le contrôle de la fissuration. Certains types de fibres sont aussi reconnus pour diminuer la fissuration provoquée par le retrait plastique [17].



Figure I.2.4 : Macrofibres synthétiques [18]

II.4.2. Fibres métalliques

Les fibres métalliques sont de types et de formes variées et présentent une très bonne compatibilité avec le béton. La figure (I.2.5) présente différentes géométries de fibres métalliques. Les fibres sont composées d'acier au carbone, d'acier inoxydable ou d'acier galvanisé contre la corrosion. En général, la longueur des fibres varie de 25 à 60 mm et le diamètre varie de 0,5 à 1,3 mm. La fabrication des fibres métalliques s'effectue selon plusieurs méthodes en relation avec leurs formes géométriques multiples (ASTM A 820) [17].

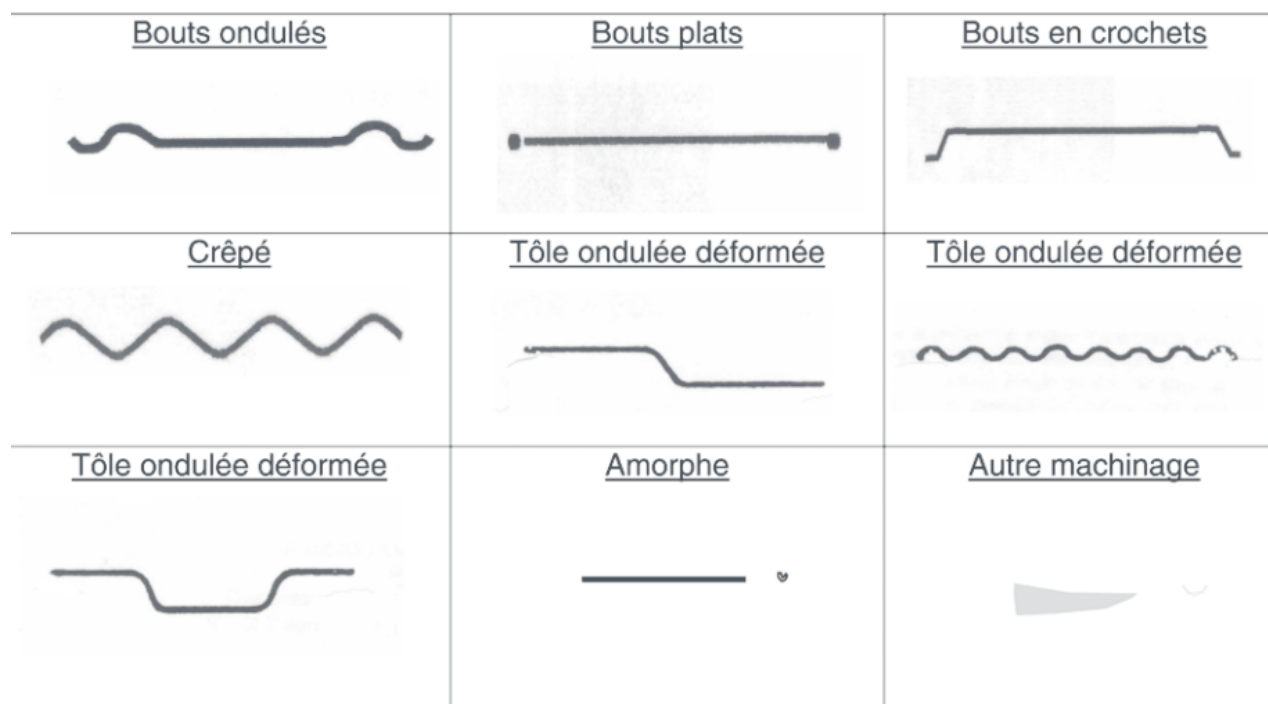


Figure I.2.5: Géométrie des fibres métalliques [17]

La norme ASTM A 820 identifie cinq types de fibres métalliques [17] :

- ❖ Type I : fil étiré à froid.
- ❖ Type II : tôle découpée.
- ❖ Type III : extrusion de matière fondue.
- ❖ Type IV : autres fibres.
- ❖ Type V : fabriqués par rasage de fil tréfilé

La plupart des fibres disponibles sur le marché sont de type I (figure I.2.6)

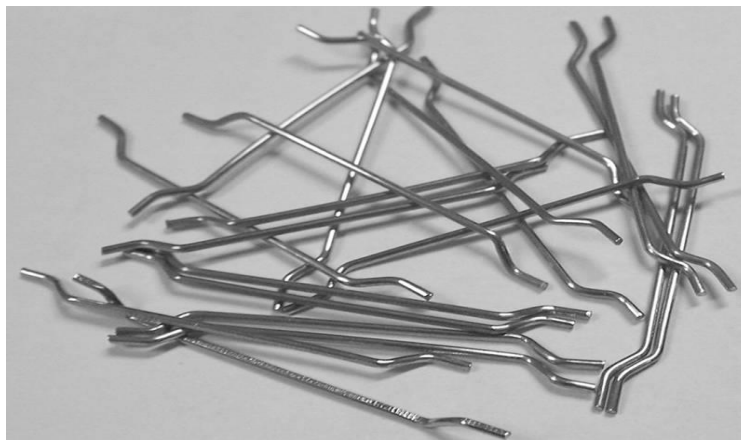


Figure I.2.6 : Fibres métalliques [18]

II.5. CONCLUSION

Les innovations constructives, qui font souvent appel à de nouveaux matériaux, ont rendu les ciments renforcés de fibres très populaires. La possibilité d'améliorer la résistance à la traction et au choc permet d'envisager une réduction du poids et de l'épaisseur des éléments, et devrait aussi réduire les dommages attribuables au transport et à la manutention. Les recherches qu'on a citées si dessus nous ont montré que parmi les facteurs qui influent sur la ductilité et la capacité de la résistance des bétons fibrés, on trouve la quantité de fibres, le type de fibres et la dispersion de celles-ci.

Chapitre 3 :

Revue bibliographique sur le SIFCON

CHAPITRE 3 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SIFCON

III.1. INTRODUCTION

Le SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete ou Béton à Infiltration de Coulis) a été produit pour la première fois en 1979 par le laboratoire de matériaux Lankard, Columbus, Ohio, États-Unis, en incorporant de grandes quantités de fibres d'acier dans des mélanges cimentaires [19].

Ce béton (SIFCON) est un type spécial relativement renforcé de fibres (acier) à haute performance (BRFHP). Il est confectionné en plaçant des fibres dans les moules à sa pleine capacité ou à la fraction de volume souhaitée, formant ainsi un réseau. Le réseau de fibres est ensuite infiltré par un coulis liquide à base de ciment ou de mortier. Les fibres peuvent être saupoudré à la main ou en utilisant des unités de dispersions des fibres pour de grandes sections. La vibration est imposée si nécessaire lors du placement des fibres et le coulis. La teneur en fibres d'acier peut être jusqu'à 30% en volume [1].

Dans un béton fibré conventionnel (BFC), où les fibres sont mélangées avec d'autres composants du béton, ce pourcentage est limité à seulement environ 2% pour des raisons pratiques de maniabilité [1].

En raison de sa haute teneur en fibres, le SIFCON a une qualité unique et des propriétés mécaniques de résistance et de ductilité intéressantes [1].

La principale différence entre le BFC et le SIFCON, en plus de la nette différence de fraction de volume de fibres, se trouve en l'absence d'agréats grossiers dans le SIFCON qui, si utilisé, va entraver l'infiltration de coulis à travers le dense réseau de fibres. En outre, le SIFCON contient des quantités de ciment et d'eau relativement élevées par rapport au béton conventionnel [1].

Bien qu'il soit encore un produit de construction relativement nouveau, le SIFCON a été utilisé avec succès dans un certain nombre de domaines depuis le début des années 1980. Certaines de ces applications sont des éléments structurels résistants aux explosions et à l'abrasion, des tabliers de pont, chaussées d'aérodrome [20].

Plusieurs travaux de recherche sur l'étude des propriétés mécaniques du SIFCON ont été menés. Ils portent sur le comportement dans des conditions de charge différentes, propagation de fissure, ténacité, ductilité ou absorption d'énergie, élasticité en traction et compression [20].

III.2. COMPOSITION DU SIFCON

Les matériaux constitutifs primaires de SIFCON sont les fibres d'acier et le coulis. La matrice peut contenir :

- ❖ Seulement le ciment (coulis ou pâte de ciment).
- ❖ Ciment et sable (mortier).
- ❖ Ciment et autres additifs (principalement des cendres volantes ou des fumées de silice).

Habituellement, on utilise des adjuvants super plastifiants qui réduisent fortement la quantité d'eau pour optimiser la fluidité du coulis et garantir une pénétration totale sans modifier le ratio eau-ciment (E/C). Le dosage du superplastifiant influence le plus la fluidité, la cohésion et l'infiltrabilité des mélanges de ciment.

III.2.1. Les fibres métalliques

Une grande variété de fibres d'acier a été étudiée pour une utilisation dans le SIFCON dans le but de développer un meilleur ancrage mécanique et un meilleur lien entre les fibres et la matrice. Les types les plus utilisés sont les fibres à crochets et ondulées déformées (Figure I.3.1) [21].

Dans la plupart des cas, la section transversale des fibres d'acier est circulaire. Il peut aussi être rectangulaire, carré, triangulaire ou plat [22].

Des exemples typiques de fibres d'acier utilisés pour le SIFCON sont indiqués sur la figure I.3.1. Dans la plupart des applications aux États-Unis et en Europe, des fibres d'acier à extrémités crochets ont été utilisées [23].

Les plus communes des fibres d'acier ont une longueur de 25 à 60 mm, et un diamètre allant de 0,4 à 1 mm. Leur rapport (l/d), c'est-à-dire le rapport longueur sur diamètre est généralement inférieur à 100, avec une gamme commune de 40 à 80 [24].

Les Fibres d'acier, augmentateur de manière significative la résistance à la compression du béton. Viable augmentation de la résistance à la compression avec la flexion de la résistance du béton HNE réalisé par l'utilisation de 3% de fibres d'acier par volume de ciment [25].

La résistance au cisaillement du béton augmente aussi que la fraction volumique des fibres d'acier augmente mais l'ouvrabilité du béton diminue jusqu'à une plus grande mesure, donc super plastifiants sont nécessaires pour être utilisé dans la FRC (Fiber-Reinforced Composite) [26].

L' fibre d'acier, l'augmentation de la dureté du béton, casser les changements de mode comme SFRC ductile le mode de défaillance par rapport au réseau de fissures dans le béton normal [26].

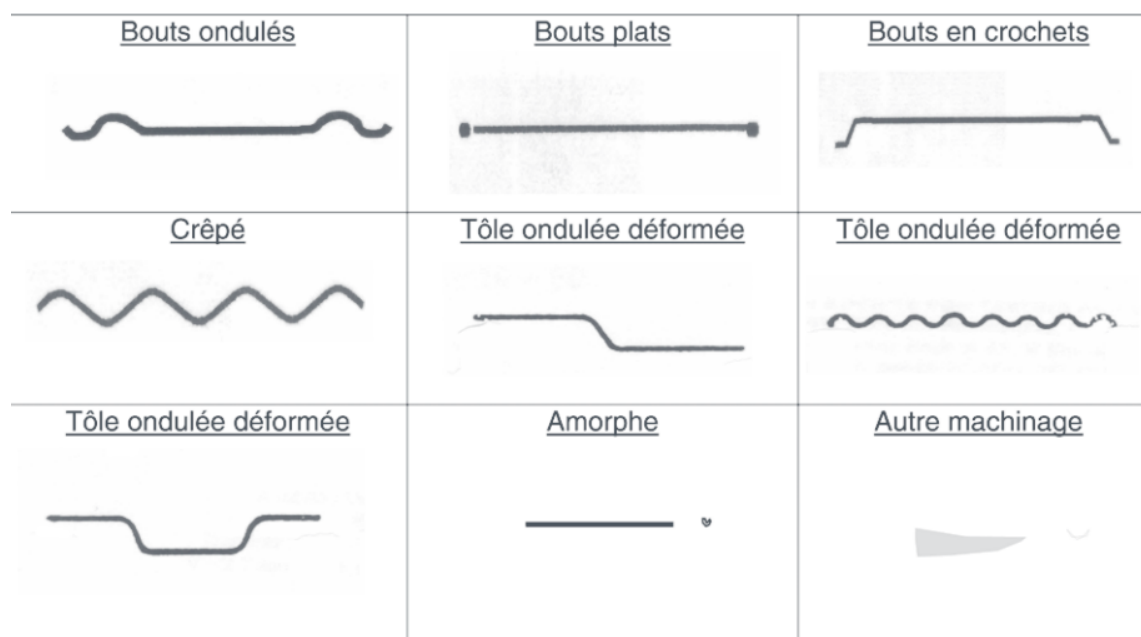


Figure I.3.1: Géométrie des fibres métalliques [19]

III.2.2. Matrice de SIFCON

La matrice de SIFCON ne contient pas de granulats grossiers qui ne peuvent pas s'infiltrer à travers les espaces minuscules entre les fibres d'acier. Les matrices des compositions étudiées dans la littérature comprennent : ciment, sable-ciment, cendres volantes - ciment, fumée de silice-ciment, cendres volantes-ciment-sable et ciment-sable-fumée de silice [21].

Les matrices contenant des additions minérales telles que cendres volantes ou les fumées de silice ont montré un meilleur comportement au retrait [23].

L'addition de fumée de silice augmenterait la résistance, alors que l'addition de cendres volantes entraîne une certaine réduction de la résistance [27].

De plus, une augmentation de la proportion de sable augmenterait la résistance à la compression [28].

III.2.3. Les proportions du mélange

Les principales variables dans les proportions de mélange sont la teneur en fibres et la composition de la matrice. La fraction de volume de fibre est généralement contrôlée par la technique de placement et la géométrie des fibres. La recommandation pour le rapport E/C pour le coulis est de 0,4 ou moins. Le superplastifiant (SP) peut être utilisé, si nécessaire, pour améliorer la fluidité du coulis [19].

En ce qui concerne les additions, environ 20 % de ciment pourrait être remplacé par de la cendre volante. Si c'est de la fumée de silice qui est utilisée, le dosage est de 10 % par rapport au poids du ciment. Le ciment peut être de type I ou type III (ASTM) [22].

Le tableau I.3.1 montre certaines conceptions du mélange tirées de 11 études différentes portant sur le SIFCON [29].

Tableau I.3.1 : Modèles de mélanges de SIFCON tirés de la littérature (Par rapport au poids du ciment)

Référénc e N°	Composition de SIFCON				
	Ciment(1)	Sable fin	Eau	cendres volantes ou fumée de (2) silice	SP
5	1	0.2	0.355	0.2	0.02
	1	0.3	0.255	0.2	0.04

6	1	-	0.3	0.1	0.048
11	1	2	0.6	-	non reporté
12	1	-	0.36	-	0.03
	1	-	0.5	-	-
13	1	1	0.4	-	Non reporté
	1	0.8	0.53	-	non reporté
	1	0.6	0.45	0.2	non reporté
	1	-	0.36	0.2	non reporté
14	1	1	0.4	-	0.013
	1	-	0.32	-	0.035
15	1	1	0.48	0.2	0.02
16	1	-	0.36	0.2	0.03
	1	-	0.325	0.25	0.04
17	1	1.5	0.4	0.2	0.01
	1	1	0.32	0.2	0.02
	1	0.5	0.24	0.2	0.03
18	1	1	0.45	-	0.032
19	1	0.9	0.5	0.3	0.024

(1) Dans toutes les références, le ciment Portland de type I a été utilisé, à l'exception des références 6 et 11 où il s'agit du Type III.

(2) Dans toutes les références, des cendres volantes ont été utilisées, à l'exception de la référence 6 où il s'agit de la fumée de silice.

Comme on peut le voir sur le tableau I.3.1, le mortier est employé plus couramment que le coulis pour la fabrication du SIFCON. Dans la plupart des situations, le taux de sable est d'environ 1, bien qu'il puisse varier entre 0,2 et 2. Il est également observé que l'incorporation de cendres volantes aide à améliorer les caractéristiques du mélange. Dans la plupart des formulations, le recours aux superplastifiants s'avère indispensable en raison du rapport eau/ciment relativement réduit et de l'exigence d'obtenir un mélange d'une fluidité élevée.

III.3. PREPARATION

Le réseau de fibres manuellement disposées dans le moule (figure I.3.2) est pénétré par un mélange fluide à base de ciment ou de mortier. Ensuite, le moule est exposé à des vibrations via une table vibrante afin d'assurer une répartition uniforme des fibres dans la matrice du coulis (figure I.3.3).



Figure I.3.2 : Placement à la main des fibres d'acier dans un moule [24]



Figure I.3.3 : Infiltration de coulis aidée par des vibrations externes [24]

III.4. RESULTATS DES RECHERCHES EFFECTUEES SUR LE SIFCON

III.4.1. Etude de Mustafa Faisal Abbas et al [30]

Cette étude a été menée pour l'étude des caractéristiques mécaniques de compositions de SIFCON (Tableau I.3.2) [30].

Tableau I.3.2 : Constituants des mélanges de béton préparés, en kg/m³ [30]

Type de mélange	Rapport E/C	Ciment	Eau	Superplastifiant	Granulat fin	Granulat grossier	% de fibres d'acier (SF)	Fibres d'acier à extrémités crochetées
M1	0,4	425	170	--	718	966	0	0
M2	0,29	885	257	12.5	885	--	6	468
M3	0,29	885	257	12.5	885	--	7	546
M4	0,29	885	257	12.5	885	--	8.5	663

Le mélange de référence (M1) se réfère à un béton traditionnel défini par un ratio eau/ciment de 0,40, sans incorporation de fibres d'acier ni d'agent superplastifiant.

Les composites de type SIFCON, aussi appelés mélanges M2 à M4, sont conçus avec un faible rapport eau/ciment (0,29) et l'ajout d'un superplastifiant pour garantir une excellente ouvrabilité. Ces combinaisons se caractérisent principalement par leur contenu en fibres d'acier à bouts en crochets, qui fluctue de 6% à 8,5% en termes de volume.

De plus, à la différence du béton standard (M1), les compositions renforcées par fibres n'incluent pas de granulats grossiers, ce qui est typique des bétons SIFCON où une importante densité de fibres se mélange à une matrice cimentaire fluide.

Les données recueillies (Tableau I.3.3) [30] ont montré une progression notable de la résistance à la compression grâce à l'ajout de fibres d'acier et à la révision de la composition du mélange.

Le béton de référence (M1) a affiché des résistances plutôt modestes, avec 18 MPa à 7 jours et 31,8 MPa à 28 jours, ce qui en fait un béton standard. Par contre, les combinaisons de type SIFCON (M2 à M4) ont présenté une amélioration significative des performances mécaniques.

Plusieurs éléments peuvent être attribués à cette amélioration :

- La diminution du taux eau/ciment (0,29), favorisant une matrice plus épaisse.
- L'emploi d'un superplastifiant, rehaussant la compacité et l'uniformité.
- La présence abondante de fibres d'acier, qui aide à freiner la diffusion des microfissures.

Il est à noter que la résistance s'accroît graduellement en fonction du pourcentage de fibres :

- M2 (6 %) atteint 74,4 MPa à 28 jours,
- M3 (7 %) atteint 89,7 MPa,
- M4 (8,5 %) atteint 113,88 MPa.

Par conséquent, le mélange M4 s'est distingué par sa performance supérieure, affichant une résistance à la compression approximativement 3,6 fois plus élevée que celle du béton de référence après 28 jours.

Finalement, tous les mélanges ont présenté une progression typique de la résistance au fil du temps, avec une hausse significative entre le 7^{ème} et le 28^{ème} jour, attestant d'une hydratation efficace du ciment et de l'évolution graduelle de la microstructure.

Tableau I.3.3 : Propriétés à l'état durci des mélanges préparés [30]

	Résistance à la compression (fc)	
	7j	28j
M1	18	31,8
M2	63	74,4
M3	77	89,7
M4	94	113,88

III.4.2. Etude de M.VIJAYAKUMAR et al [31]

Cette étude a été menée pour l'étude des caractéristiques mécaniques de SIFCON dont

Les formulations sont illustrées par le Tableau I.3.4 [31].

Tableau I.3.4 : Proportion de mélange du SIFCON [31]

Mélange	Ciment	Cendres volantes (FA)	Rapport FA/Ciment	Rapport E/C	Superplastifiant (%)	Teneur en fibres d'acier (%)
M1	1	1	0,5	0,45	2	6
M2	1	1	0,5	0,45	2	8
M3	1	1	0,5	0,45	2	10
M4	1	1	0,5	0,45	2	12

Les résultats obtenus (Figure I.3.4) [31] ont montré un accroissement graduel d'un mélange à l'autre. Cette progression illustre l'impact direct du contenu en fibres d'acier sur les caractéristiques mécaniques du matériau.

- En ce qui concerne le mélange M1, il a présenté la plus petite résistance, ce qui est en accord avec sa faible concentration ou son absence de fibres.
- Les combinaisons M2 et M3 ont affiché une nette amélioration, suggérant que l'incorporation de fibres a aidé à solidifier la matrice cimentaire.
- Le mélange M4 a montré une plus grande résistance, prouvant que l'accroissement du taux de fibres améliore de manière significative la capacité portante.

De plus, on observe que :

- Les chiffres à 28 jours sont toujours plus élevés que ceux à 7 jours, ce qui illustre l'évolution graduelle de l'hydratation du ciment.
- Pour les mélanges riches en fibres, la différence entre les deux âges se réduit légèrement, ce qui pourrait signaler une structure plus compacte et un renforcement rapide de la résistance à un jeune âge.

Toutefois, l'évolution de la résistance semble se stabiliser pour les niveaux élevés de fibres, indiquant qu'au-delà d'un certain point, l'utilité marginale des fibres décroît.

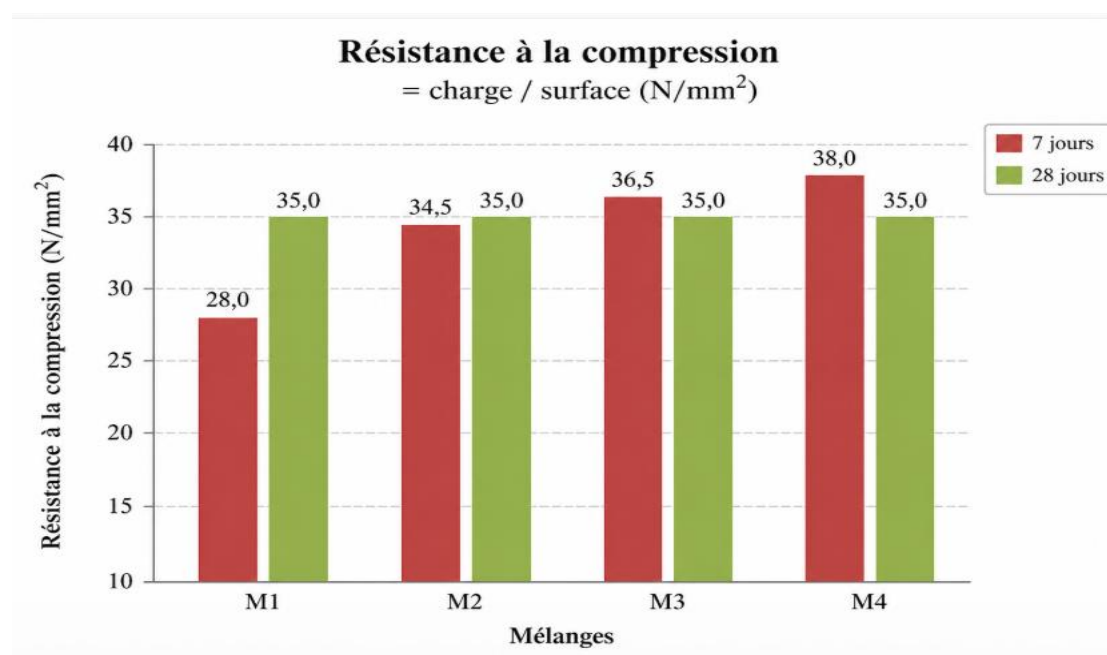


Figure I.3.4 : Résistance à la compression [31]

Les résultats des résistances à la traction sont présentés par la Figure I.3.5 [31].

En règle générale, une amélioration graduelle de la résistance à la traction a été notée particulièrement lorsque la concentration en fibres d'acier s'accroît. Cette évolution soutient l'idée que les fibres ont un impact positif sur le comportement mécanique du béton, notamment en ce qui concerne la traction indirecte.

Concernant le mélange M1, la résistance a été la plus basse, ce qui concorde avec la présence ou la contribution négligeable des fibres dans la matrice de ciment. Par contre, les combinaisons M2 et M3 ont démontré une hausse significative de la résistance, indiquant une amélioration du transfert des contraintes et une diminution de l'avancée des fissures.

Le mélange M4 a affiché les valeurs maximales, signifiant une notable optimisation de la performance en traction. Cette hausse est essentiellement due à l'effet de pontage des fibres d'acier, qui restreint la largeur des fissures et favorise la souplesse générale du matériau.

Toutefois, on observe que certaines séries de résultats demeurent assez stables pour un mélange identique, ce qui pourrait signifier une limite d'efficacité des fibres au-delà d'une certaine quantité.

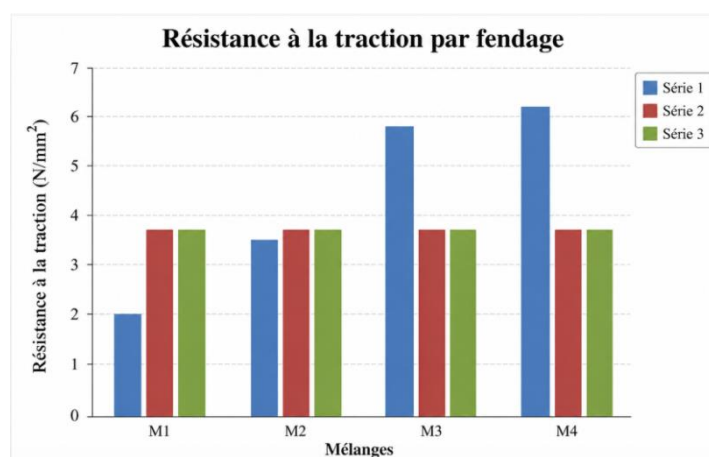


Figure I.3.5 : la résistance à la traction par fendage [31]

III.4.3. Etude de Aliyaa M. Alsheameri et al [32]

Cette étude a été menée pour l'étude des caractéristiques mécaniques de SIFCON [32]

Les compositions étudiées sont données par le tableau I.3.5.

Tableau I.3.5 : Résultats des essais du SIFCON à l'état durci [32]

Méthode	Résistance à la compression 7 jours (MPa)	Résistance à la compression 28 jours (MPa)	Résistance à la traction par fendage (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Module de rupture (MPa)
Méthode multicouche	78.2	93	18.6	23.7	28.5
Méthode progressive	92.1	106	20.1	25.85	30

Les résultats trouvés ont clairement montré l'impact de la technique d'application sur les caractéristiques mécaniques des bétons. Ils ont indiqué une amélioration notable de la résistance à la compression pour l'approche progressive comparée à l'approche multicouche reflétant une compacité améliorée de la matrice cimentaire. La technique progressive facilite une répartition optimale des fibres et diminue les zones poreuses, contribuant ainsi à une continuité renforcée du cadre solide.

La résistance à la traction a suivi la même tendance. Cette progression, bien qu'elle soit légère, elle a reflété l'efficacité des fibres d'acier, qui mettent en place un mécanisme de pontage des fissures (crack bridging), retardant leur progression et augmentant la ductilité du matériau.

L'augmentation du module d'élasticité traduit une rigidité supérieure du matériau fabriqué par technique progressive attribuée à une compacité supérieure de la matrice cimentaire, une diminution de la microfissuration précoce, une interaction optimisée entre les fibres et la matrice.

Le module de rupture a également suivi une tendance croissante témoignant d'une capacité accrue du matériau à supporter les tensions de flexion avant de se rompre. Elle est directement associée à l'apport des fibres d'acier dans la répartition des contraintes et l'absorption d'énergie.

III.5. APPLICATIONS DU SIFCON

Même si le SIFCON reste un matériau assez récent, son utilisation s'est révélée fructueuse dans divers domaines, notamment pour les applications nécessitant une grande ductilité. Cela inclut une large gamme de structures conçues pour résister aux séismes, installations militaires, structures étanches et résistantes aux détonations. Outre diverses autres applications à l'aéroport, sur les trottoirs, dans les parkings et sur les ponts. Voici quelques exemples d'applications réussies de SIFCON mentionnées dans les publications scientifiques. Ces mesures ont été mises en œuvre aux États-Unis depuis le début des années 1980 [22].

III.6. STRUCTURES RESISTANTES AUX TREMBLEMENTS DE TERRE

L'utilisation de SIFCON dans les régions articulées des structures résistantes aux tremblements de terre a été examinée. La recherche a montré que l'utilisation du SIFCON préfabriqué articulé en flexion pour augmenter la résistance sismique poutres en béton armé. Il a été trouvé que les articulées en SIFCON renforcées peuvent présenter des performances supérieures par rapport aux articulées en béton armé. De nombreux problèmes rencontrés avec les articulées en béton armé ne se produisent pas lors de l'utilisation des articulées SIFCON avec une plus grande résistance au cisaillement et un robuste seuil fissures de flexion dans le SIFCON renforcé [22].

Une autre étude a également prouvé que l'utilisation de SIFCON dans les connexions systèmes de cadrage permet une ténacité et une ductilité beaucoup plus que celles du béton à fibres

conventionnelles. La figure I.3.4 illustre l'application désassemblages SIFCON dans des cadres résistants aux séismes [23].

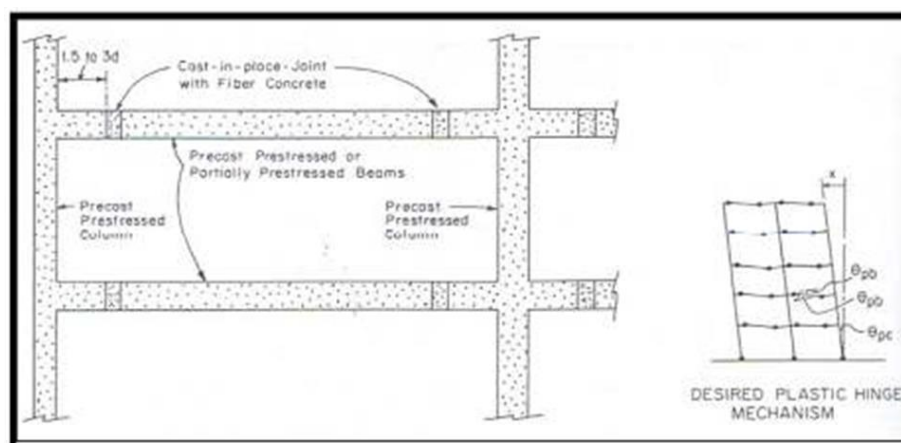


Figure I.3.4: Représentation schématique des joints SIFCON dans le système structural [22]

III.7. REPARATION ET MODERNISATION DE COMPOSANTS STRUCTURELS

Le SIFCON est un matériau de réparation de choix en raison de sa compatibilité avec le béton armé, tant du point de vue de la rigidité que des variations dimensionnelles dues à la température. Il peut être positionné dans des zones difficiles d'accès et assure un bon lien avec le béton d'origine grâce à la présence de fibres. La matrice peut être ajustée selon le type de réparation concerné. Par exemple, on peut obtenir une augmentation rapide de la force en utilisant des accélérateurs [33].

Le SIFCON a été mis en œuvre pour la restauration des poutres en béton précontraint sur une route au Nouveau-Mexique, aux États-Unis. Les poutres avaient subi des dommages à cause du passage de véhicules sous le pont. Quelques-uns des tendons précontraints ont subi une dégradation. Les poutres ont été réhabilitées grâce à l'utilisation du SIFCON, sans qu'il soit nécessaire de les retirer [33].

La réparation sur site peut non seulement engendrer une importante réduction des coûts, mais aussi minimiser le temps de réparation à quelques mois. Les résultats ont été encourageants jusqu'à 8 ans post-intervention [20].

III.8. STRUCTURES RESISTANTES AUX EXPLOSIONS

Le SIFCON, grâce à sa grande capacité de résistance à la flexion et à la compression couplée à une ductilité prononcée, est projeté pour l'application dans des structures destinées à supporter les impacts de charges explosives [20].

Par exemple, il a servi à la fabrication de conteneurs destinés à ranger différentes sortes de munitions. L'objectif central de cette application est de restreindre la diffusion des explosions d'un conteneur à un autre. Le SIFCON a été employé dans la construction des structures de silo pour missiles [34].

Le nouvel Institut de recherche du Mexique a élaboré un modèle de structures de silo à missiles. La hauteur du silo était de 6 m, avec une séparation SIFCON de 15 cm entre deux plaques d'acier de 6 mm d'épaisseur [34].

D'abord, les sections de la doublure en acier, tant intérieures qu'extérieures, ont été totalement construites en sections de 1,5 m. Par la suite, les fibres d'acier ont été disposées entre les doublures, puis le coulis a été introduit grâce à des vibrations externes sur une montée et une descente de 1,5 m afin de réaliser un composite bien compacté [34].

Suite à sa construction, la structure de silo entièrement instrumentée a été exposée à une charge explosive. Dans ce test, la performance de la structure SIFCON a été considérée comme exceptionnelle, surpassant même les anticipations [34].

SIFCON a aussi prouvé une remarquable résistance à la pénétration des projectiles.

III.9. AUTRE APPLICATION

Ce produit, en rapport avec la sécurité, comme les serrures de coffre et les coffres forts, doit posséder une robustesse exceptionnelle face au dynamitage, au chalumeau, au perçage et à l'écaillage. Le béton armé et l'acier présentent tous deux quelques vulnérabilités. Par exemple, on peut mettre le feu à l'acier et aux parois ou les percer.

L'emploi du SIFCON dans cette application a mis en évidence ses bénéfices comparativement au béton et à l'acier. Les murs SIFCON sont incombustibles, car le béton qu'ils contiennent offre une résistance accrue à l'endommagement dû à la chaleur tout en ralentissant également la propagation de celle-ci. Grâce à sa grande ductilité, le matériau composite a pu résister à la

pression de l'explosion. L'infiltration de fibres rend le forage extrêmement ardu. De ce fait, SIFCONN est efficacement utilisé pour divers modèles de portes de coffre-fort.

III.10. CONCLUSION

Le béton fibré infiltré par coulis (SIFCON) est un matériau composite à haute performance reconnu pour sa résistance mécanique élevée et sa grande ductilité. Toutefois, ses propriétés dépendent fortement de la teneur et du type de fibres incorporées. Elles sont principalement attribuées au rôle des fibres d'acier dans le mécanisme de pontage des fissures, à l'amélioration de l'adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire, ainsi qu'au contrôle de la propagation des microfissures d'où l'intérêt du SIFCON comme matériau à hautes performances mécaniques, susceptible d'être utilisé dans des applications structurelles soumises à des sollicitations élevées [19].

PARTI II : ETUDE
EXPRIMENTALE ET
RESULTATS

Chapitre1 :

Matériaux utilisés

CHAPITRE1 : MATERIAUX UTILISES

I.1. INTRODUCTION

Le travail que nous exposons souligne l'emploi de fibres dans le coulis pour la conception d'un nouveau genre de béton (SIFCON).

Ce chapitre détaille les matériaux utilisés au cours de cette étude. Les procédés et les techniques de caractérisation des composants présentés dans ce chapitre se basent sur des normes écrites.

L'ensemble des essais expérimentaux a été effectué au sein du :

- Laboratoire pédagogique des matériaux du département de génie civil (Université de Mostaganem).
- Laboratoire de recherche Matériaux et Procédés de Construction (LMPC) du département de génie civil (Université de Mostaganem).

I.2. LE CIMENT

Un seul type de ciment a été utilisé dans la composition des coulis, c'est un ciment Portland au calcaire CPJ/NA442 CEM II/B-L 42,5 N provenant de la cimenterie de LAFARGE sous le nom commercial « Matine ». Il contient de 65 à 79 % de clinker. Le reste est composé de constituants secondaires tel que le gypse comme régulateur de prise.

Matine est un ciment pour bétons destinés à la construction des ouvrages d'art, infrastructure et superstructure pour bâtiments et préfabrication légère.

La composition chimique du ciment est donnée par le tableau II.1.1.

Tableau II.1.1 : Composition chimique du ciment utilisé [35]

Analyse chimique	Valeurs
Perte au feu (%) (NA5042)	5,03
SO ₃ (%)	2,20
MgO (%)	1,80
Teneur en chlorures (NA5042) (%)	0,02 - 0,05
SiO ₂	19,34

CaO	61,69
Al ₂ O ₃	5,37
K ₂ O	0,76
Na ₂ O	0,14
CaO libre	0,97
Fe ₂ O ₃	3
Résidus insolubles	1,12

Sa composition minéralogique illustrée dans le tableau II.1.2 est obtenue grâce aux formules de Bogue appliquées au clinker ordinaire.

Tableau II.1.2 : Composition minéralogique du clinker

Composants du clinker (Bogue)	Valeurs (%)
C ₃ S (%)	58,3
C ₃ A (%)	8,7
C ₂ S	14,6
C ₄ AF	11,26

La masse volumique apparente est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre rempli de ciment sans aucun tassement.

La masse volumique absolue du ciment a été déterminée par le pycnomètre et le benzène. La consistance normalisée de la pâte de ciment est déterminée selon la norme NF EN 196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde.

La finesse de mouture d'un ciment est caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée des grains contenus dans une masse donnée. La surface spécifique Blaine du ciment a été déterminée par la méthode du perméabilimètre de Blaine selon la norme NF EN 196-6 et exprimée en cm²/g.

Ces caractéristiques physiques sont groupées dans le tableau II.1.3.

Tableau II.1.3 : Caractéristiques physiques du CPJ CEM II 42,5

L'état du ciment	Caractéristiques	Valeurs
Ciment anhydre	Masse volumique apparente (g/ cm ³)	1,01
	Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,997
	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	4351,17
Pâte de ciment	La consistance de la pâte (ml)	147,5

I.3. L'ADJUVANT

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau ViscoCrete TEMPO-12 de Sika (Figure II.1.1).

Ses principales caractéristiques sont comme suit :

- Nature : liquide
- Couleur : brun clair à foncé
- Densité (20° C) : $1,060 \pm 0,010$
- Extraits secs : $29,5 \pm 1,4\%$
- Plage de dosage : 0,2 à 3,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées
- Il doit être incorporé de préférence dans l'eau de gâchage ou en fin de malaxage.

L'efficacité maximale de ce produit doit être déterminée après des essais de convenance prenant en compte les caractéristiques rhéologiques et les performances mécaniques souhaitée pour le béton.



Figure II.1.1 : L'adjuvant utilisé

I.4. EAU

Dans notre recherche nous avons utilisé l'eau potable du robinet conforme au gâchage. Associée au ciment, l'eau remplit deux fonctions : d'une part elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte.

I.5. LES FIBRES

Les fibres choisis « Dramix®45/50BL (Acier nu Libre) » (Figure II.1.2) sont certifiées pour une utilisation structurelle conformément à la norme EN_14889-1.

La gamme Dramix® 3D est la référence dans le renforcement en fibres d'acier. En combinant des performances élevées, une durabilité et une facilité d'utilisation, la gamme 3D offre une alternative plus rapide et rentable face aux solutions traditionnelles de renforcement du béton :

- Ancrage original
- Résistance à la traction standard

Dramix® 3D est une solution économique pour :

- Les sols industriels.
- Les applications relatives aux tunnels.
- La préfabrication.

- Les applications relatives aux bâtiments.
- Résidentiels.

a. Propriétés du matériau :

- Résistance à la traction : σ_t : 1.115 N/mm²
- Tolérances : $\pm 7,5\%$ moyenne
- Module de Young : ± 210.000 N/mm²

b. Géométrie :

- Famille de fibre 3D
- Longueur (l) 50 mm
- Diamètre (d) 1,05 mm
- Elancement (l/d) 45

c. Dosage minimum :

- 20 kg par m³ (conformément au label CE)



Figure II.1.2 : Type de fibres utilisées

I.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, tous les composants de notre béton ont été répertoriés, une démarche essentielle avant de commencer l'analyse expérimentale de ce dernier. Le chapitre suivant décrit les méthodes expérimentales employées dans le cadre de cette recherche.

Chapitre 2 :

Méthodes expérimentales

CHAPITRE 2 : METHODES EXPERIMENTALES**II.1. INTRODUCTION**

Il est crucial de maîtriser diverses caractéristiques telles que les propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques des matériaux dans toute activité de construction ou de répartition. L'objectif étant de sélectionner judicieusement ces matériaux en fonction de leur usage, afin d'assurer un bon malaxage et obtenir ainsi un mélange homogène à grande échelle avec des caractéristiques uniformes.

Dans cette section, nous exposons les standards et les méthodes de malaxage employées pour la préparation de nos mélanges, coulis et béton. Nous évoquons également les divers tests expérimentaux réalisés pour les définir à l'état frais et durci.

II.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX**II.2.1. Essais sur le ciment anhydre*****II.2.1.1. Masse volumique absolue***

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue du ciment anhydre qui varie en fonction de la composition du ciment, tout en restant comprise entre 3,0 et 3,2 g/cm³.

Principe de l'essai :

On opère en comparant la masse (m_c) d'un volume connu de ciment (v_c) à la masse (m_t) d'un même volume d'un liquide (benzène) dont la masse volumique (ρ_t) est connue. La masse volumique du ciment (ρ_c) s'en déduit en écrivant :

$$\rho_c = \frac{\rho_t (m_c)}{(m_t)} \dots\dots (1)$$

Équipement nécessaire :

- Un pycnomètre d'une contenance minimale de 50 cm³.
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le ciment, (le benzène).
- Une balance.

Conduite de l'essai :

- Déterminer la masse M1 du pycnomètre rempli de benzène jusqu'au niveau du trait repère $V = 250 \text{ ml}$. $M1 = 313,4 \text{ g}$.
- Déterminer la masse M2 de ciment. $M2 = 30 \text{ g}$.
- Introduire la quantité de ciment pesé dans le pycnomètre, remplir de benzène et amener le niveau de benzène au niveau du trait repère. Vérifier que le pycnomètre ne contient aucune bulle d'air. Peser alors le pycnomètre, soit $M3 = 334,6 \text{ g}$

La masse volumique absolue du ciment est :

$$\rho_c = \frac{M2}{M1 + M2 - M3} \times \rho_l \dots\dots (2)$$



Figure II.2.1 : Procédure de mesure de la masse volumique absolue du ciment

II.2.1.2. Masse volumique apparente

Il s'agit de déterminer la masse volumique apparente de ciment selon la norme [NF P 18-554].

Équipement nécessaire :

- Entonnoir sur trépied.
- Tamis de 2 mm.
- Une mesure d'un litre.
- Une règle à araser.
- Balance de précision : force de 4 à 5 Kg sensibilité 1 à 2 cg.

Conduite de l'essai :

- Placer l'entonnoir au-dessus d'un récipient de volume V (de préférence 1 litre). Fermer l'opercule.
- Verser une petite quantité (200 g environ) de liant sur la passoire et la faire descendre dans l'entonnoir à l'aide de la spatule, ouvrir l'opercule : le ciment descend dans la mesure et refermer l'opercule.
- Recommencer avec de nouvelles quantités (200g) jusqu'à ce que se produise le débordement tout autour puis araser à la règle et peser le contenu.

La masse volumique apparente du liant est : $\rho = M \text{ (g / cm}^3\text{)}$.

Les différentes étapes de l'essai sont présentées par la figure II.2.2



Figure II.2.2 : Procédure de mesure de la masse volumique apparente du ciment

II.2.1.3. Mesure de la finesse

Objectif de l'essai :

Déterminer la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. Elle est exprimée en cm^2/g , conformément à la norme [EN-196-6].

Principe de l'essai :

Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est long. La surface massique est proportionnelle à $t^{1/2}$. La masse volumique du ciment étant connue.

Equipement nécessaire utilisé :

- Une salle maintenue à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et à une humidité relative de 65%;
- Un appareil appelé « perméabilimètre de Blaine » (figure II.2.3) dont la description complète est donné par la norme [EN 196-6];
- Une balance précise à 0.001g près ;
- Un chronomètre précis à 0.2 s près ;
- Des rondelles de papier filtrent adaptées au diamètre de la cellule
- Un thermomètre précis à 0.1 $^\circ\text{C}$.



Figure II.2.3 : L'appareil de Blaine

II.2.2. Essai sur les fibres

Il s'agit de mesurer la masse volumique des fibres par la méthode de l'éprouvette graduée ; cette méthode est très rapide et elle utilise du matériel très courant de laboratoire.

Principe de l'essai :

Pour opérer dans de bonnes conditions, utiliser une éprouvette graduée (Figure II.2.4) en verre. La lecture des niveaux V_1 et V_2 doit se faire en bas du ménisque formé par l'eau. En effet, celle-ci a tendance à remonter sur les bords de l'éprouvette sur une hauteur de 1 à 2 mm, ce qui fausse bien sûr la lecture des volumes si la lecture est effectuée en haut du ménisque.

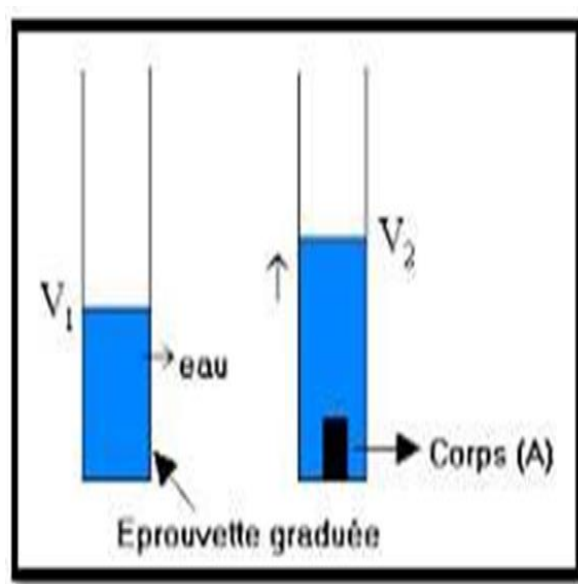


Figure II.2.4 : Méthode de l'éprouvette graduée

Équipement nécessaire :

- Eprouvette graduée d'une contenance minimale de 250 ml.
- Une balance.
- Un liquide d'une masse volumique connue par exemple l'eau.

Conduite de l'essai :

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume $V_1 = 140$ ml d'eau.
- Peser un échantillon des fibres $MF = 120$ g et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.

- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume $V_2=156$. La masse volumique est alors :

$$\rho_F = \frac{MF}{V_2 - V_1}$$



Figure II.2.5 : Mesure de la masse volumique des fibres

II.3.1. Essais sur pâtes normalisées

II.3.1.1. Essai de consistance

La consistance de la pâte de ciment (pourcentage d'eau/pâte pure) caractérise sa fluidité. On a effectué l'essai avec l'appareil de Vicat (Figure II.2.6) conformément à la norme [EN-196-3]. On déduit un rapport $E/C = 0,25$.



Figure II.2.6 : Appareil de VICAT muni de sa sonde de consistance

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres il faut pouvoir 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 évaluée 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 ».

Equipement nécessaire utilisé :

- Une salle maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative d'au moins 65%.
- Un malaxeur décrit dans la norme [EN 196-1] (figure II.2.10).
- Un appareil de Vicat muni d'une sonde.
- L'appareil, schématisé sur la figure II.2.7, est, pour l'essentiel, composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde d'un diamètre $\varphi = 10$ mm. La partie coulissante a une masse totale de 300 g (y compris la sonde amovible).
- Une balance permettant de peser à 1 g près. Conduite de l'essai :
- Peser 500 g de ciment.
- Peser 125 g d'eau.

- Verser l'eau dans le récipient du malaxeur puis ajouter le ciment en un temps compris entre 5 et 10 s. La fin du versement du ciment donne le temps 0.
- Ajouter 500 g de ciment à l'eau, en un temps compris entre 5 et 10 s. La fin du versement du ciment donne le temps 0.
- Mettre immédiatement le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 s.
- Arrêter le mouvement, démonter le batteur et récipient, racler les parois du récipient puis remonter le tout en une durée d'environ 15 s.
- Remettre le malaxeur en marche pour une durée de 90 s à vitesse lente.
- Remplir le moule tronconique de la pâte fabriquée et araser la face supérieure.
- Placer le moule et son support sur le socle de l'appareil.
- Immobiliser la sonde au contact de la pâte.
- Régler l'index des graduations au point 0 et libérer la partie mobile sans vitesse initiale.
- Noter l'indication de l'index sur la graduation après immobilisation de la partie mobile.
- Si l'épaisseur mesurée est supérieure à 7 mm ; il n'y a pas assez d'eau.
- Si l'épaisseur mesurée est inférieure à 5 mm ; il y a trop d'eau.
- La pâte sera de consistance normalisée si l'épaisseur $d = 6 \text{ mm} \pm 1$.

II.3.1.2. Essai de prise

Objectif de l'essai :

Déterminer les temps de début et de fin de prise des pâtes pures des ciments étudiés conformément à la norme [EN 196 3].

Principe de l'essai :

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte de consistance normalisée avec échauffement.

L'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipée d'une aiguille de Vicat (Figure II.2.7). Quand la partie mobile est libérée l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide, le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte que de 0,5 mm.

Equipement nécessaire utilisé :

- Une armoire maintenue d'une manière continue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 90% ;
- Appareil de Vicat est équipé de :
- D'une aiguille de 1,13 mm + porte aiguille.
- Masse mobile de 1000g (partie mobile 300g + masse supplémentaire 700g).



Figure II.2.7 : Appareil de Vicat muni d'aiguille

Conduite de l'essai :

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme [EN 196-3] :

- Confectionner une pâte normalisée. Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur. La consistance recherchée de la pâte, une fois atteinte, la pâte est introduite dans le moule tronconique comme indiquée pour l'essai de consistance ;
- Remplir le moule tronconique, et araser la face supérieure ;
- Mettre le moule dans l'armoire en attendant, que la prise soit commencée ;

- Quand le moment supposé du début de prise approche, on fait sortir le moule de l'armoire et on le met sur le socle de l'appareil ;
- Immobiliser l'aiguille au contact de la pâte ;
- Libérer la partie mobile sans vitesse initiale ;
- Relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base ;
- Si l'arrêt se produit à une distance $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$; la prise est commencée ;
- Si non, on retourne le moule dans l'armoire qu'on le sortira qu'à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$
- On retourne le moule tronconique utilisé pour la détermination du début de prise de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face du moule en contact avec la plaque de base.

II.4. METHODES DU COULIS (CONE DE MARSH) NF P 18-358

Pour étudier le comportement rhéologique d'un ciment en présence de superplastifiant on utilise la méthode du coulis qui consiste à mesurer la perte de fluidité dans le temps d'un coulis de ciment.

II.4.1. Objectif de l'essai

Le principal intérêt de la consistance normalisée est de définir une consistance qui servira de référence dans l'essai de prise ou dans l'essai de stabilité. En général, les pâtes de ciment entrant dans la composition des mortiers ou des bétons ont des consistances beaucoup plus fluides et donc des dosages en eau plus importants.

Le cône de Marsh (Figure II.2.8) est un outil très efficace pour caractériser globalement la fluidité et vérifier la constance des formulations en laboratoire et sur site. On a utilisé la méthode du coulis qui consiste à mesurer la fluidité dans le temps d'un coulis de ciment. L'essai consiste à mesurer le temps qu'il faut pour vider un cône contenant 1 litre de coulis à travers un orifice d'évacuation de 5 mm de diamètre. Ce temps est de 31.5 ± 0.5 secondes pour l'eau.

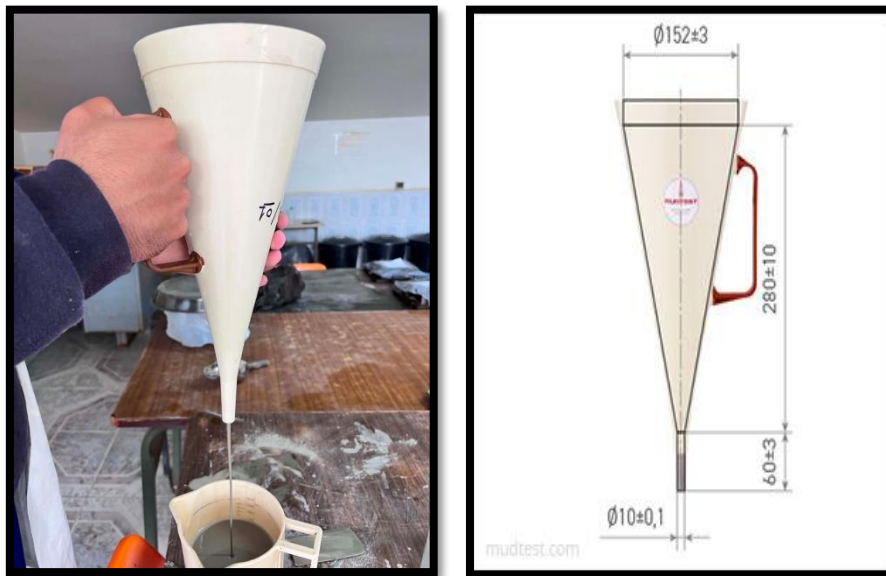


Figure II.2.8 : Cône de Marsh utilisé dans la méthode du coulis

II.4.2. Principe de l'essai

Il s'agit de mesurer la rapidité d'écoulement du coulis sous l'effet de son propre poids à travers un ajutage. Plus l'écoulement sera rapide et plus le coulis sera réputé être fluide.

II.4.3. Conduite de l'essai

Le cône de Marsh doit être solidement fixé pour ne pas être déplacé par les vibrations et sa partie supérieure doit être horizontale. On commence par obturer l'orifice d'évacuation inférieure et on verse 1 litre de coulis dans le cône. On démarre le chronomètre au moment où on libère l'orifice. On arrête le chronomètre dès que le litre de coulis s'est déversé dans un cylindre gradué que l'on place sous l'orifice du cône. Le temps d'écoulement que l'on mesure permet d'évaluer la fluidité du coulis. Plus ce temps est long, plus le coulis est visqueux et plus il est court, plus le coulis est fluide. Dans le cas des coulis de ciment Portland, on mesure le temps d'écoulement à 5 et à 60 minutes après le début du malaxage.

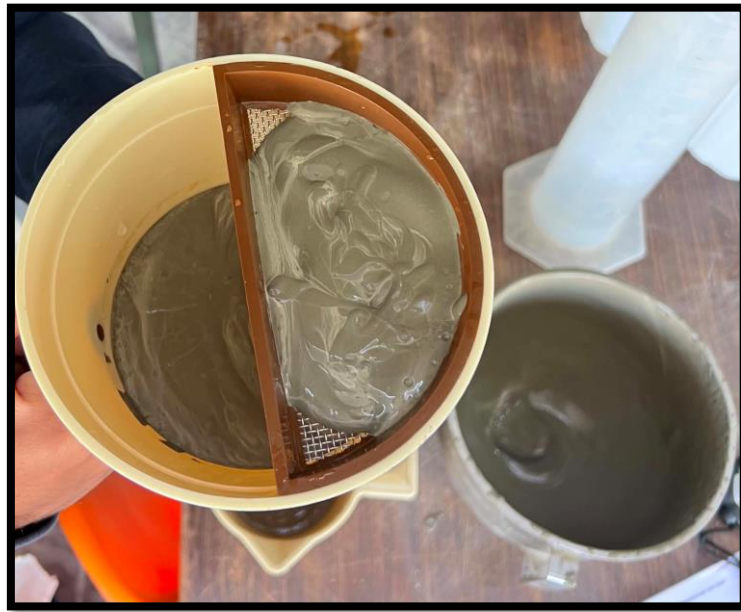


Figure II.2.9 : Ecoulement de coulis

II.4.4. Equipement nécessaire utilisé

Dans cette recherche, on a utilisé un matériel simple disponible au niveau de notre laboratoire.

II.4.4.1. Malaxeur

Les propriétés rhéologiques varient énormément selon le mode de malaxage et le dosage des constituants employés. Avant tout travail, le mode de malaxage doit être désigné selon les moyens disponibles et la quantité de coulis à préparer. Parmi les appareils utilisés à l'université de Mostaganem pour le malaxage des coulis de ciment le malaxeur, représenté sur la (Figure II.2.10). Cet appareil normalisé [EN 196-1], sur lequel se basent pratiquement toutes les normes pour la préparation du coulis.



Figure II.2.10 : Malaxeur normalisé

II.4.4.2. Cône de Marsh

Le cône de Marsh (Figure II.2.11) est utilisé depuis longtemps par l'industrie pétrolière pour mesurer la fluidité des coulis de ciment ou de bentonite. Le cône de Marsh est muni d'un ajutage cylindrique démontable en partie inférieure du tronc conique. Le diamètre de l'ajutage peut être choisi en se basant sur les propriétés rhéologiques des coulis pour obtenir un temps d'écoulement significatif. En général, il est de l'ordre de 5 à 12 mm à partir duquel on peut mesurer le temps d'écoulement d'un litre de coulis.



Figure II.2.11 : Cône de Marsh

II.4.4.3. Chronomètre

Un chronomètre (Figure II.2.12) de précision 1/100 de seconde a été utilisé pour mesurer le temps d'écoulement du coulis.



Figure II.2.12 : Chronomètre

II.4.5. Composition des coulis de ciment

Une série de coulis est préparée qui doit être composé en masse, d'une part de ciment (CPJ), et d'autre part d'eau. Ce mélange est confectionné pour un rapport E/C de 0.35 fixé. Et d'un adjuvant superplastifiant (ViscoCrete Tempo 12).

Ce mélange contenant CPJ-SP présente des teneurs en superplastifiant SP variant de 1.8 , 2, 2.2 et 2.4 (%) du poids de ciment (Tableau II.2.1).

La fluidité des coulis est évaluée en fonction du type de ciment, le type de superplastifiant et son dosage ainsi que le rapport E/C.

Tableau II.2.1 : Composition des coulis

Ciment de LAFARGE (Matine) CPJ	Superplastifiant/ (%C)	1.8	2	2.2	2.4
	E/C	0.35			

II.4.5.1. Malaxage du coulis

Il faut malaxer chaque gâchée de coulis mécaniquement au moyen du malaxeur spécifié. Le malaxeur étant en position de marche mais pas en fonctionnement :

- Mettre dans le bol du malaxeur 1700 g de ciment.
- Introduire la 2/3 (397) de l'eau de gâchage.
- Mettre alors immédiatement le malaxeur en marche pendant 60 s à vitesse lente.
- Arrêter le malaxeur, et Introduire le 1/3 (198) de l'eau de gâchage plus le superplastifiant progressivement en malaxant pendant 60 s à vitesse lente.
- Mettre le malaxeur à sa vitesse la plus grande et continuer à mélanger pendant 60 s supplémentaires. (le malaxage dur 180 s).
- Préparer le coulis à l'essai d'écoulement au cône de March.

Les étapes de préparation du coulis et de mesure au cône de March sont illustrées par la figure (II.2.13), figure (II.2.14) et figure (II.2.15) :



Figure II.2.13 : Préparation du coulis



Figure II.2.14 : Remplissage du cône

II.4.5.2. Mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh

Le principe est de mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de coulis à travers un ajutage. Plus le temps est court, plus le coulis est fluide. Cette mesure au cône de Marsh peut être aussi utilisée pour déterminer le dosage de superplastifiant qui est le dosage à partir duquel le temps d'écoulement ne diminue pas appréciablement. Après la préparation du coulis, sa fluidité au cône de Marsh est évaluée en suivant les étapes ci-dessous comme c'est illustré sur la Figure II.2.15.

- Fixer le cône de Marsh.
- Fermer l'ajutage ou (l'orifice) du cône de Marsh à l'aide du doigt.
- Prélever le coulis dans le bol et verser sur le tamis de cône jusqu'à ce que le niveau de coulis affleure 1 litre dans le cône.
- Déclencher le chronomètre au moment où l'on enlève le doigt qui bouche l'orifice et laisser couler dans la tasse graduée.
- Stopper le chronomètre lorsque le niveau de coulis atteint 1 litre.

On fait une première mesure de l'écoulement à 5 minutes après le premier contact eau ciment. On place ensuite le coulis dans un récipient qui sera recouvert d'un film plastique pour éviter toute évaporation d'eau. On effectue une deuxième mesure de l'écoulement à 60 minutes après

le début de l'essai, et en prenant le soin de remuer le coulis une minutes environ avant cette mesure.

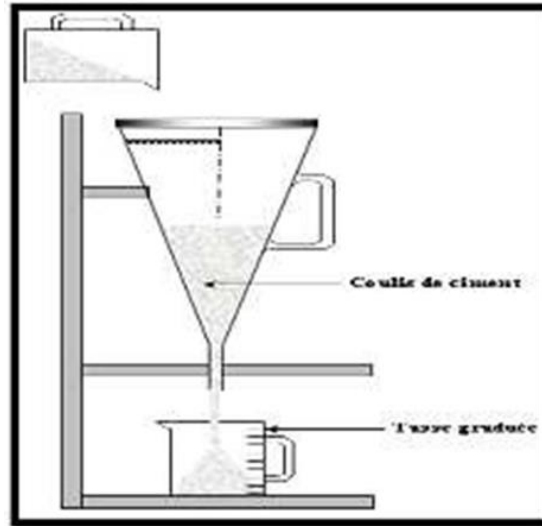


Figure II.2.15 : Mode opératoire pour la mesure de fluidité du coulis

II.5. METHODES DE PREPARATION DU BETON (SIFCON)

II.5.1. Matériaux et proportions de mélange

Les matériaux constitutifs primaires de SIFCON sont des fibres d'acier et coulis de ciment. Le coulis peut contenir :

- Le ciment.
- L'eau.
- Le superplastifiant avec un pourcentage égal à 2.2 % pour améliorer la fluidité du coulis et assurer une meilleure infiltration des fibres sans augmenter le rapport eau-ciment (E/C).

Chaque mélange SIFCON a été préparé à l'aide d'un seul type des fibres et avec une fraction de volume de fibre égale à 5 % et 7% (Tableau II.2.2).

Tableau II.2.2 : Compositions de SIFCON kg/m³

Pourcentage des fibres	Ciment	Adj	E/C	Eau	Fibre
SIFCON 5%	1384	32	0,25	346	392,5
SIFCON 7%	1384	32	0,25	346	549,5

II.5.2. Confection du béton

Pour la confection des gâchées, nous avons utilisé beaucoup de matériels et fournitures courants (balances, récipients, truelles, spatules, huile de coffrage.....), mais également des appareils tels que le malaxeur, table de vibration.....)

Des méthodes d'optimisation de leur formulation ont été spécialement développées. Les fibres présentent une très bonne compatibilité avec les divers constituants du coulis y compris l'adjuvant. Les fibres ont généralement tendance à rigidifier la matrice cimentaire. Cette diminution de l'ouvrabilité doit être compensée par l'utilisation de superplastifiant. La maniabilité du béton dépend de la dimension des fibres et de leur dosage.

Le processus d'élaboration du SIFCON consiste à placer les fibres dans le moule ou dans un coffrage et à insérer le coulis de ciment par la suite. Il est nécessaire d'utiliser la vibration externe pour assurer l'introduction du coulis de ciment.

Dans ce programme expérimental, deux types de moules ont été considérés (Figure II.2.16) : les moules de dimensions 7x7x28 cm pour la détermination des résistances à la flexion 3 points et les moules de dimensions 10x10x10 cm destinés aux essais de résistance à la compression. Ils doivent être graissés avant leur utilisation.



Figure II.2.16: moules normalisés

Les étapes de préparation du mélange sont représentées dans la figure II.2.17 :



Figure II.2.17 : Les étapes de préparation du mélange

II.5.3. Conservation des éprouvettes

Le moule rempli de béton est convenablement identifié, puis placé jusqu'au moment du démoulage couvert d'un couvercle (film plastique), sur un support horizontal dans une salle humide ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, humidité relative supérieure ou égale à 90%).

Le démoulage est effectué entre 48 h après le moulage. Les éprouvettes sont alors marquées avec un crayon résistant à l'eau (Figure II.2.18).



Figure II.2.18 : Le démoulage des éprouvettes

II.5.4. Conservation des éprouvettes dans l'eau

Les éprouvettes marquées sont immergées dans l'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ dans des récipients adéquats jusqu'au moment de l'essai (Figure II.2.19). Les éprouvettes doivent être retirées de l'eau, et doivent rester au moins 30 min à l'ombre pour bien sécher.

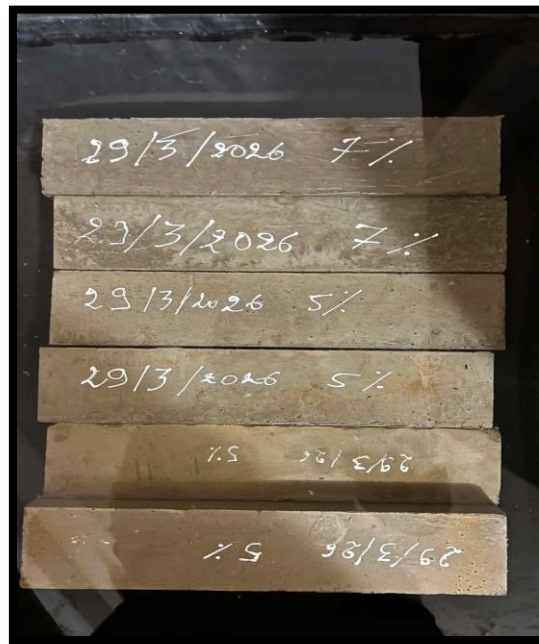


Figure II.2.19 : conservation des éprouvettes dans un bac rempli d'eau

II.5.5. Résistances mécaniques des bétons

II.5.5.1. Mesure des résistances à la compression et à la traction EN 196-1

Objectif de l'essai :

Il s'agit de définir les qualités de résistance des fibres dans ce béton (SIFCON). Principe de l'essai :

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de béton. On a utilisé deux méthodes pour mélanger ce béton, alors on a comparé entre ces méthodes pour savoir laquelle est la plus conforme.

Essais de compression :

L'essai de compression consiste à rompre le corps d'épreuve entre les deux plateaux d'une presse de compression. La presse utilisée, est une machine de compression de modèle RP2000 QC et d'une capacité maximale de 2000KN conforme à la norme EN 12390-4.

➤ L'essai de compression sur des cubes équivalents :

L'essai de compression sur des cubes équivalents de 10x10x10 cm, a été réalisé sur la même machine de compression (figure II.2.20).



Figure II.2.20: Machine de compression utilisée

Essai de traction par flexion :

La résistance à la traction par flexion a été déterminée à l'aide d'une machine de flexion 3 points de 100 kN à 200 bars, sur des éprouvettes prismatique 7x7x28 cm conformément à la norme Normes : EN 12390-5.

Les éprouvettes ont été disposées dans la machine d'essai comme indiquée sur la (figure II.2.21).

Après un centrage parfait, la mise en charge a été effectuée avec une vitesse de montée de charge constante.

Au moment de rupture, la résistance à la traction par flexion est calculée comme suivant ;

$$M = \frac{P \cdot a}{2}$$

$$f_{tj} = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{6M}{a^3}$$

Pr ; la charge de rupture. Et 'a' le coté de la section carrée de l'éprouvette (7 cm).

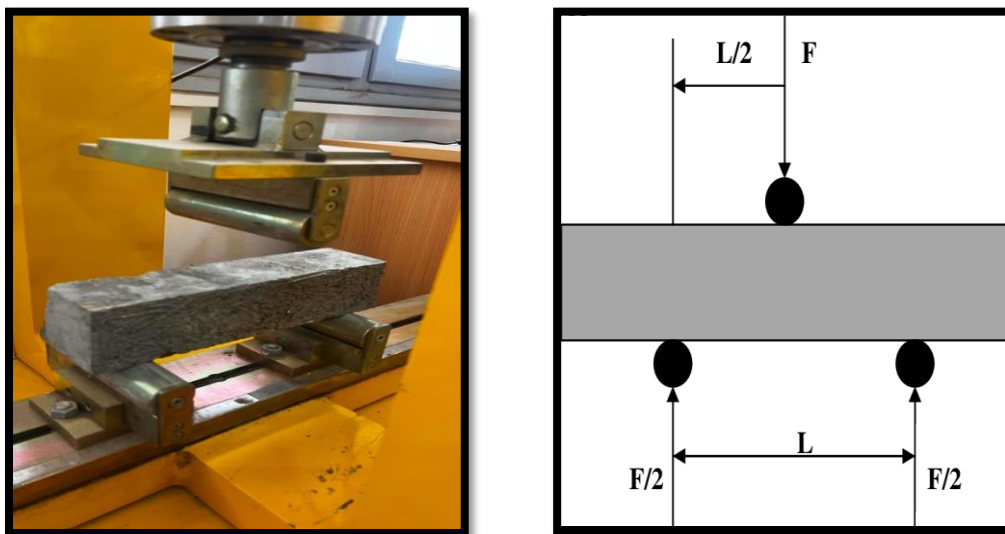


Figure II.2.21 : Dispositif de traction par flexion

II.5.6. Propriété physique de béton (*Essai de mesure de la masse volumique*)

Les mesures ont été accompagnées par les pesées des éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ et $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ (Figure II.2.22) dans le but de calculer la masse volumique de béton à l'état durci.

Le principe de l'essai est la connaissance du poids de l'éprouvette de béton mesuré à l'aide d'une balance (Figure II.2.22) et de son volume permettant de calculer son poids volumique.



Figure II.2.22 : Les pesées des éprouvettes

II.6. CONCLUSION

L'objectif de cette étude expérimentale est de confronter les performances physico-mécaniques d'un coulis en fonction de divers pourcentages d'adjuvant afin de déterminer le dosage de saturation en superplastifiant, qui correspond au dosage à partir duquel le temps d'écoulement ne se réduit pas significativement.

Dans la conception d'un nouveau genre de béton (SIFCON), qui est un béton à infiltration de coulis contenant des fibres, nous avons adopté une technique de mélange basée sur la superposition de couches de fibres et de coulis accompagnée de vibration.

Des tests ont été établis pour évaluer les performances du béton : la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion, qui sont les caractéristiques les plus cruciales sous l'effet de deux pourcentages de fibres à savoir 5% et 7% en volume.

Après avoir décrit les différents matériaux et les procédures des tests, nous présentons et analysons dans le chapitre qui suit les divers résultats obtenus.

Chapitre 3 :

Résultats et analyse

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET ANALYSE

III.1. INTRODUCTION

Cette partie présente d'une part, les résultats et les interprétations relatifs aux essais de caractérisations des matériaux entrant dans la composition du béton. Il s'agit de :

- La masse volumique apparente et absolue ainsi que la surface spécifique du ciment,
- La masse volumique apparente des fibres,
- L'essai de consistance et de mesure du temps de prise.

D'autre part, les résultats des travaux expérimentaux sur coulis et béton ont été présentés, illustrés et analysés, à savoir ceux relatifs :

- Aux coulis en vue de montrer l'influence de l'adjuvant sur leurs comportements rhéologiques. Ils permettent de donner des interprétations sur la fluidité des coulis composés de ciment CEM II et de super plastifiants ViscoCrete TEMPO-12 à 5 et à 60 minutes, ainsi que l'effet du dosage en super plastifiant.
- Au comportement mécanique à la traction et à la compression des SIFCONs élaborés

III.2. RESULTATS DE COULIS

III.2.1. La consistance

L'essai de consistance (réalisé avec l'appareil de Vicat) permet de déterminer la quantité d'eau optimale pour obtenir une pâte de ciment dite "normale" ni trop fluide, ni trop sèche. Cette étape est indispensable pour garantir la fiabilité des tests de temps de prise du ciment.

Pour commencer notre projet il faut fixer la quantité d'eau par rapport au ciment donc on doit déterminer le rapport E/C relatif à une consistance normale en utilisant l'appareil de Vicat (EN 196-3). Le Tableau II.3.1 indique une consistance normale pour un rapport E/C de 0.295.

Tableau II.3.1 : Résultats de consistance

Pâte de ciment	valeur
Eau (g)	147.5
Ciment (g)	500
E/C	0.295

III.2.2. Temps de prise

Il s'agit de trouver les temps de début et de fin de prise des pâtes pures de ciment étudiées conformément à la norme (EN 196 3), les résultats sont représentés dans le tableau II.3.2 et la Figure II.3.1.

Tableau II.3.2 : Résultats des temps de prise

Caractéristiques	Ciment CEM II
Début de prise (min)	130
Fin de prise (min)	240
Temps de prise (min)	110

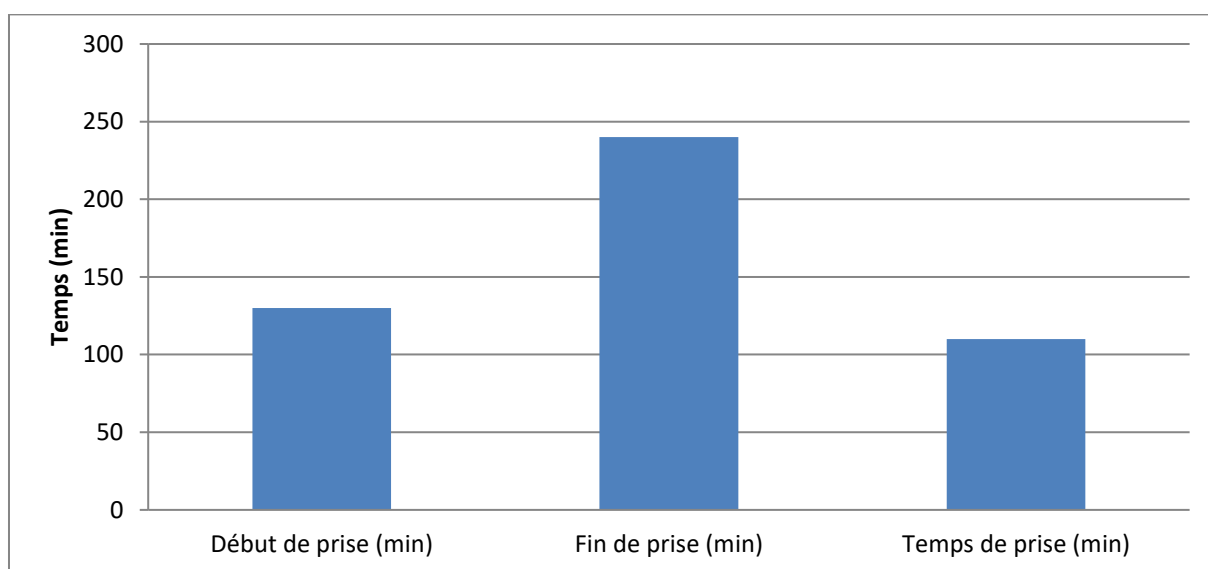


Figure II.3.1 : Evaluation de temps de prise du ciment.

La pâte du ciment obtenue présente un temps de début et de fin de prise qui correspondent aux valeurs données par la fiche technique et répondent aux exigences de la norme ASTM C 595 (ASTM C 595, 2003). Cette norme précise que les temps de prise initial et final d'une pâte de ciment mélangée ne doivent être ni inférieurs à 45 min ni supérieurs à 420 min.

III.2.3. La masse volumique des fibres

Les résultats des mesures ont donné :

La masse des fibres $M_f = 120$ g

Le volume d'eau $V_1 = 140$ ml

D'après l'essai on a trouvé V_2 (Fibre + eau) = 156 ml d'où $V_2 - V_1 = 16$ ml

Donc la masse volumique des fibres ρ_f est évaluée comme suit :

$$\rho_f = \frac{M_f}{V_2 - V_1} = 7,6 \text{ g/cm}^3$$

III.2.4. Analyse des propriétés des coulis de ciment

L'étude expérimentale s'articule sur la mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh d'un coulis de ciment ($E/C = 0.35$) et ce après 5 mn et 60 mn du début de malaxage, en faisant varier le dosage de l'adjuvant.

Le tableau II.3.3 donne les formulations de coulis de ciment étudiées.

Tableau II.3.3 : Dosages des constituants pour 1L

Dosage % de superplastifiant	Ciment (g)	Eau (g)	Superplastifiant (g)
1.8	1700	595	30.6
2	1700	595	34
2.2	1700	595	37.4
2.4	1700	595	40.8

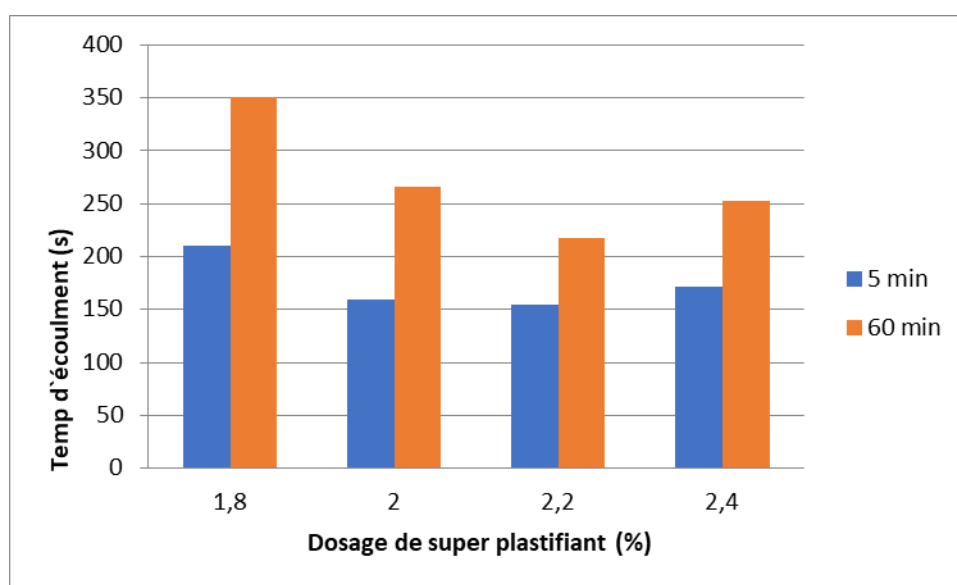
III.2.4.1. L'influence du Dosage en Superplastifiant sur la fluidité du coulis à 5 et 60 mn

Le tableau II.3.3 et la figure II.3.2 présentent les résultats de la fluidité enregistrés à 5 et 60 minutes au cône de Marsh des coulis de différentes proportions de superplastifiant (1.8% -2% - 2.2% - 2.4%)

Il est à noter que pour les coulis avec une forte proportion de superplastifiant, une diminution de temps d'écoulement est observée surtout au voisinage du dosage de 2.2%.

Tableau II.3.3 : Les résultats obtenus de temps d'écoulement de coulis à 5 et à 60 min

Dosage de superplastifiant	Temps d'écoulement à 5 min (s)	Temps d'écoulement à 60 min (s)
1,8	210	350
2	159	266
2,2	155	218
2,4	171	252

**Figure II.3.2** : Variation des temps d'écoulement à 5 et 60 minutes pour les coulis

III.2.4.2. Perte de fluidité

La perte de la fluidité d'un coulis est caractérisée par la différence du temps d'écoulement enregistrée à 5 et à 60 minutes. Un coulis est dit stable s'il conserve sa fluidité aussi longtemps que possible. Les résultats illustrés sur le tableau II.3.4 et la Figure II.3.3 montrent que la perte de fluidité diminue avec le dosage en super plastifiant. Dans le coulis de ciment lorsqu'on ajoute 2.2 % de super plastifiant au ciment ayant un rapport E/C de 0.35, on observe une chute dans le temps d'écoulement de 63 secondes. On conclue que le dosage de saturation en superplastifiant qui sera pris en compte dans les compositions des bétons (SIFCON) est de 2.2%.

Tableau II.3.4 : Résultats de la perte de fluidité des coulis

Dosage de Superplastifiant (%)	L'écoulement à 5 min (s)	L'écoulement à 60 min (s)	Perte de fluidité (s)
1,8	210	350	140
2	159	266	107
2,2	155	218	63
2,4	171	252	81

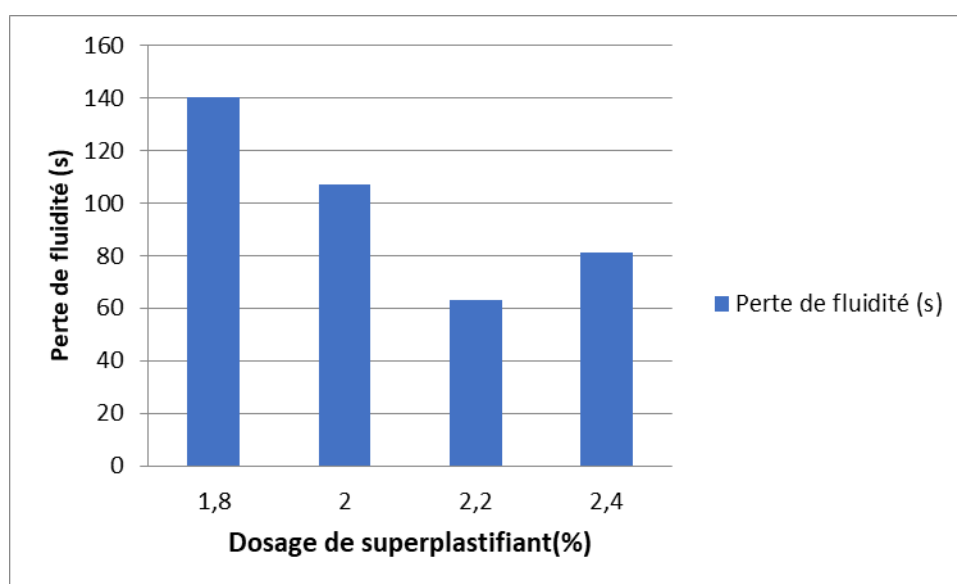


Figure II.3.3 : Perte de fluidité pour les coulis

III.3. PROPRIETES PHYSICO - MECANQUES DU SIFCON

III.3.1. La masse volumique de SIFCON

Les masses volumiques des éprouvettes de SIFCON sont illustrées dans le tableau II.3.5 et la Figure II.3.4.

Tableau II.3.5 : masses volumiques des SIFCON

SIFCON	La masse volumique (kg/m ³) éprouvette (7x7x28)	La masse volumique (kg/m ³) éprouvette (10x10x10)
5%	3360	2354
7%	3600	2498,6

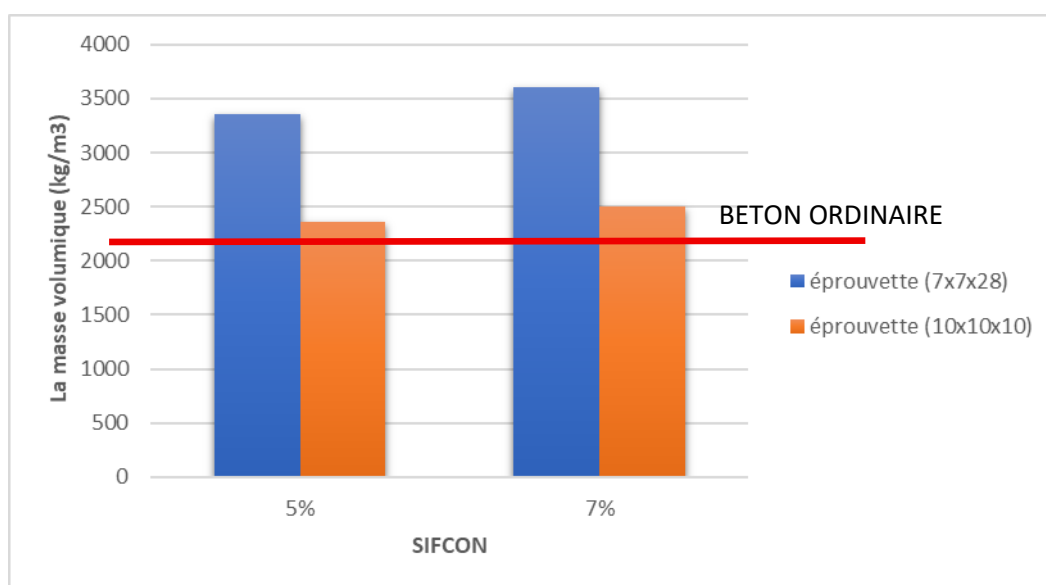


Figure II.3.4 : Masses volumiques des SIFCON

Les valeurs des masses volumiques mesurées sur les éprouvettes de SIFCON qu'elles soient prismatiques ou cubiques sont supérieures à 2200 Kg/m³ (masse volumique d'un béton ordinaire) ce qui leur attribue le caractère de bétons denses et par conséquent résistants. Par ailleurs, il est évident que l'accroissement de la masse volumique est dépendant de l'augmentation du dosage en fibres.

III.3.2. Performances mécaniques

L'un des points importants à étudier dans notre recherche est en effet les performances mécaniques.

Les essais sur les différentes éprouvettes ont été effectués à différentes échéances (7, 14, 28 et 60 jours) sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm destinées aux essais de la résistance à la

traction par flexion trois points et éprouvettes cubiques 10x10x10 cm destinées aux essais de la résistance à la compression (Figure II.3.5).



Figure II.3.5: Processus d'écrasement des éprouvettes dans les presses

III.2.3.1. SIFCON 5%

Les résultats des résistances à la traction et à la compression du SIFCON 5% sont représentés dans le tableau II.3.6.

Tableau II.3.6 : Résistances à la compression et à la traction

Age (jours)	Compression (MPa)	Traction (MPa)
7 jours	52,3	42,1
14 jours	61,4	48,8
28 jours	71,1	56,9
60 jours	75,2	65,2

La courbe de la figure II.3.6 montre l'évolution des résistances à la traction du SIFCON 5%

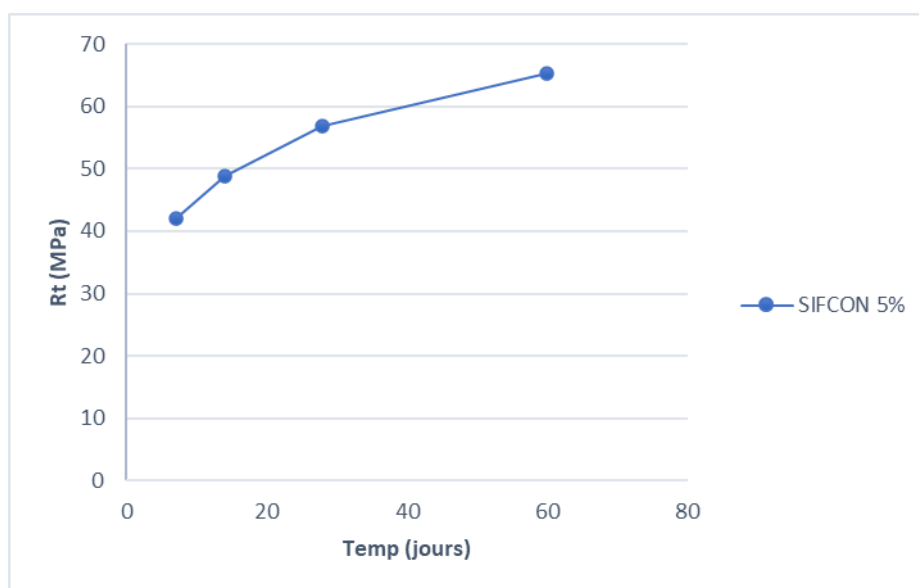


Figure II.3.6 : Evolution des résistances à la traction du SIFCON 5%

La figure II.3.7 illustre les éprouvettes utilisées pour le test de traction par flexion, démontrant ainsi la résistance du SIFCON. Bien que des fissures soient visibles sur les éprouvettes, elles ne se sont pas divisées en deux comme c'est souvent le cas avec d'autres bétons soumis à cette épreuve.



Figure II.3.7 : Aspect des éprouvettes destinées à l'essai de traction

La courbe de la figure II.3.8 donne les résistances à la compression du SIFCON 5%.

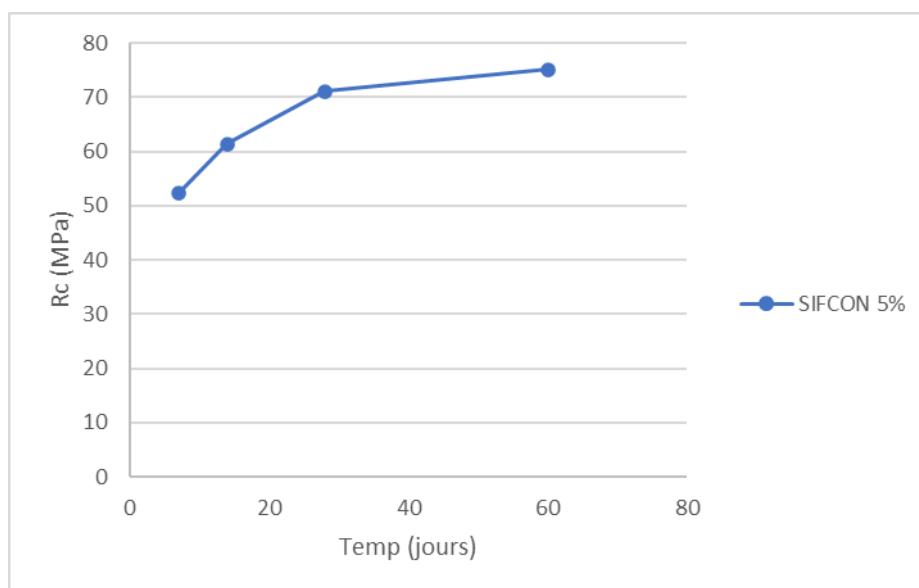


Figure II.3.8 : Evolution des résistances à la compression du SIFCON 5%

II.2.3.2. SIFCON 7%

Les résultats des mesures des résistances à la compression et à la traction du SIFCON 7% sont illustrés dans le tableau II.3.7

Tableau II.3.7 : Résistances à la compression et à la traction

Age (jours)	Compression (MPa)	Traction (MPa)
7 jours	54,6	46,4
14 jours	67,2	65,4
28 jours	79,2	73,9
60 jours	84,4	107

Les valeurs des résistances à la traction et à la compression du SIFCON 7% sont présentées respectivement par les figures II.3.9 et II.3.10. L'aspect des éprouvettes destinées à l'essai de compression est représenté par la figure II.3.11.

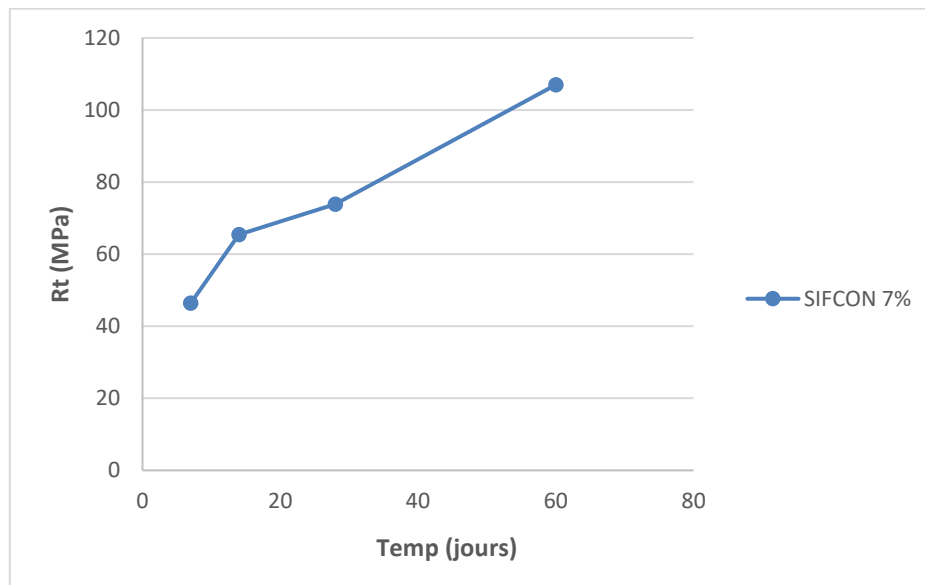


Figure II.3.9 : Résistances à la traction du SIFCON 7%

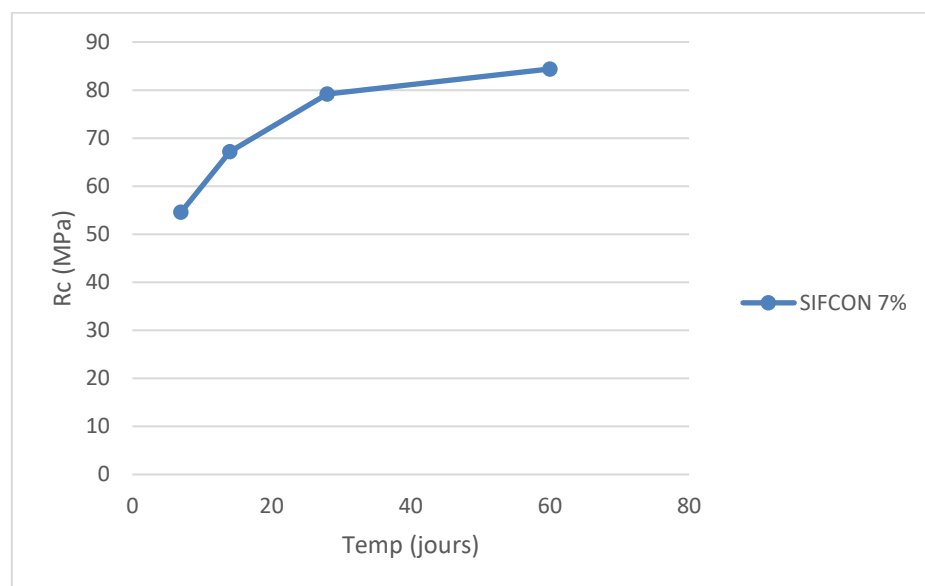


Figure II.3.10 : Résistances à la compression du SIFCON 7%



Figure II.3.11: Aspect des éprouvettes destinées à l'essai de compression

III.2.3.3. Comparaison des deux bétons

➤ Résistance à la compression

La comparaison des résistances à la compression relatives aux deux bétons est illustrée par la figure II.3.12.

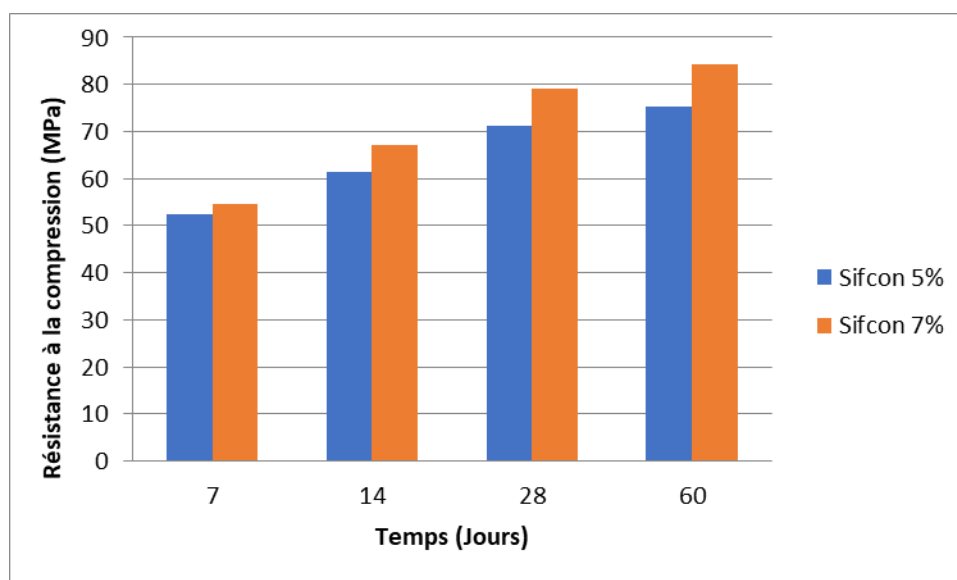


Figure II.3.12 : Comparaison des résistances à la compression entre les deux pourcentages

➤ Résistance à la traction par flexion

La comparaison des résistances à la traction relatives aux deux bétons est illustrée par la figure II.3.13.

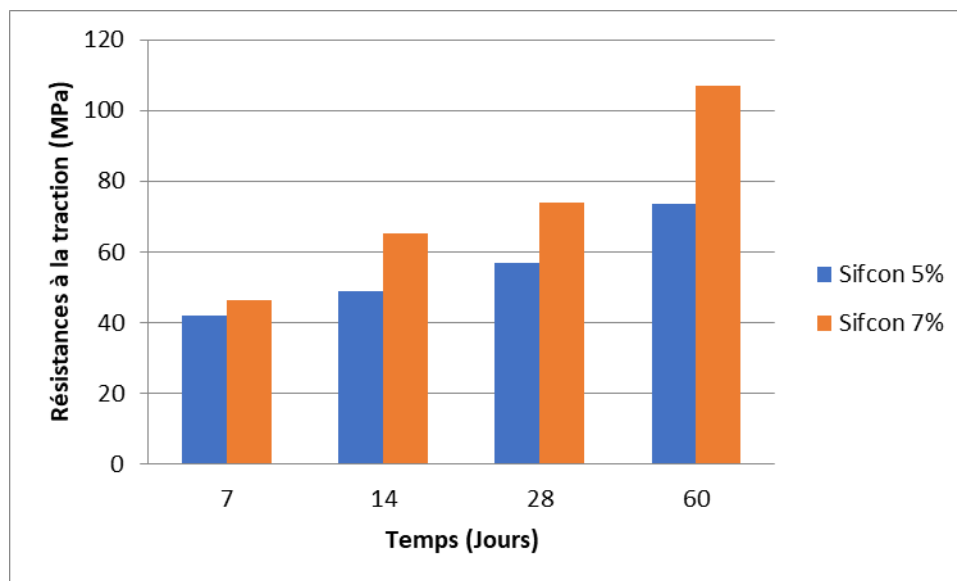


Figure II.3.13 : Comparaison des résistances à la traction entre les deux pourcentages

Commentaires

En observant les graphiques, on constate qu'augmenter le taux de fibres de 5 % à 7 % améliore les performances dans les deux cas, mais l'impact est très différent selon le type de sollicitation:

Pour la compression, le gain est assez modeste. L'écart entre les deux mélanges reste relativement stable et assez faible, oscillant entre 6 % et 12 % au fil du temps. Pour donner un ordre d'idée, après 60 jours, le Sifcon à 7 % atteint environ 84 MPa contre 75 MPa pour le modèle à 5 %. C'est logique : en compression, c'est avant tout la densité de la pâte de ciment qui fait le travail. Les fibres, quant à elles, se contentent principalement de renforcer la cohésion globale en empêchant le matériau de trop se déformer latéralement

En revanche, lorsqu'on passe à la traction, l'effet du taux de fibres est tout simplement spectaculaire. On voit clairement l'écart se creuser au fil des jours. Par exemple, à 60 jours, la résistance du béton à 7 % grimpe à environ 107 MPa, soit un bond de près de 46 % par rapport à celle du béton à 5 % (qui atteint 73 MPa).

C'est là que le rôle des fibres prend tout son sens : elles agissent comme de véritables "ponts" microscopiques. Lorsque des fissures tentent de se former sous l'effet de l'extension, les fibres jouant le rôle de couture des fissures, les maintiennent fermées et empêchent leur propagation, ce qui booste radicalement la résistance du matériau.

III.3. CONCLUSION

Nous avons mis en évidence les effets de l'introduction de 5% et 7% de fibres métalliques dans le coulis de ciment incorporant 2.2% de superplastifiant :

- Les SIFCON issus du mélange 7% présentent des masses volumiques supérieures à ceux du mélange 5%.
- Les meilleures performances mécaniques sont obtenues toujours avec le SIFCON 7%.

En résumé, ces résultats confirment que le SIFCON est bien plus qu'un simple béton : c'est un matériau composite à haute performance, caractérisé par une ductilité remarquable. En poussant le dosage à 7 %, on densifie le maillage interne, créant un réseau d'enchevêtrement mécanique quasi optimal. Ce renforcement permet au matériau d'encaisser des charges impressionnantes, ce qui le rend idéal pour les structures critiques devant résister à des sollicitations extrêmes, qu'il s'agisse d'efforts de traction pure, de chocs violents ou de flexions répétées.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Notre étude s'est donnée pour mission d'explorer le potentiel d'un matériau innovant : le SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete), un béton composé d'un réseau de fibres d'acier imprégné de coulis. L'objectif était de parvenir à concevoir un béton, aux performances mécaniques élevées, à base de 5% et 7% de fibres.

Le SIFCON ne se classe pas dans la catégorie du béton classique ou le béton fibré traditionnel. Sa composition unique le rend fondamentalement différent, ce qui nous a obligés à adapter nos méthodes de test et de contrôle pour garantir la fiabilité des résultats.

Il faut toutefois admettre que caractériser finement un tel matériau est un défi de taille. Dans le cadre de notre laboratoire, avec les moyens à notre disposition, mener une étude exhaustive sur l'ensemble des paramètres influents s'est révélé complexe.

Les conclusions suivantes ont été tirées sur la base des résultats obtenus :

- D'après les résultats de caractérisation des matériaux utilisés dans notre recherche, ces derniers sont conformes aux normes en vigueur.
- La fluidité du coulis est très liée à la composition du ciment. La perte de fluidité diminue avec le dosage en superplastifiant puis rebondit au-delà d'un dosage bien précis nommé le dosage de saturation en l'occurrence 2.2 % par rapport à la masse du ciment
- Les bétons étudiés se distinguent par des masses volumiques supérieures à 2200 Kg/m³ (masse volumique d'un béton ordinaire) ce qui leur attribue le caractère de bétons denses et par conséquent résistants. Par ailleurs, l'accroissement de la masse volumique est dépendant de l'augmentation du dosage en fibres.
- Il est à noter que le dosage en ciment du SIFCON est largement supérieur aux autres types de bétons ce qui contribue forcément à la densification de la matrice du béton et à l'amélioration de ses performances mécaniques.
- Le SIFCON à base de 7% de fibres présente une masse volumique supérieure à celle du SIFCON à 5%, ce qui est normal. Néanmoins, ces SIFCONs se révèlent plus denses que les bétons conventionnels.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

- Mis à part le fait que les bétons étudiés affichent des caractéristiques mécaniques intéressantes, augmenter le taux de fibres de 5 % à 7 % a amélioré ces performances affichant ainsi une augmentation de 12% et 46% de la résistance à la compression et à la traction respectivement.

Travaux de recherches suggérés en prolongement :

Nos critères de résistance demandant d'être complétés par l'étude de l'influence des autres paramètres sur cette résistance comme :

- Le choix du superplastifiant,
- La géométrie des fibres,
- La variation du pourcentage des fibres.....etc.

Pour la suite, nous recommandons vivement d'utiliser un ciment de meilleure qualité, idéalement du CEM I, car celui utilisé pour cette étude a montré ses limites.

Par ailleurs, pour booster les performances du SIFCON, l'intégration d'un sable fin (classe 0/1) dans le mélange nous semble indispensable. Non seulement cela facilite grandement l'étape de malaxage, mais la littérature confirme que c'est un vrai levier pour améliorer les propriétés mécaniques, la durabilité et la compacité globale du matériau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]-D.R. Lankard, «Steel Fiber Concrete, US-Sweden Joint Seminar», June 1985.
- [2]-Construction and Building Materials, Suelen da Rocha Gomes. 24 April 2023
- [3]-PAGEL Mortiers spéciaux
- [4]-Ciments en PPF, partie 4 les mortiers et coulis, les techniques particulières de mise en œuvre.
- [5]-Construction and Building Materials, 25 October 2024. Gang Peng
- [6]-R. Dupain, R. Lanchon, J.C. Saint-Arroman, « GRANULATS, SOLS, CEMENTS, ET BETON », Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. Nouvelle édition conforme aux normes européennes. Casteilla, 2004.
- [7]-« NOUVEAU GUIDE DU BETON ET DE SES CONSTITUANTS ». Edition Eyrolles 61bd saint-Germain 75240 Paris).
- [8] R. Dupain, R. Lanchon, J.C. Saint-Arroman, « GRANULATS, SOLS, CEMENTS, ET BETON ». Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. Nouvelle édition conforme aux normes européennes. Casteilla, 2004.).
- [9]-C. Caron, « Injection des sols », Nouvelle Edition, Edition Eyrolles, Paris, 1995.)
- [10]-Mohammed, M.H., et al. (2014) Rheological Properties of Cement-Based Grouts Determined by Different Techniques. Engineering
- [11]-Ning Sun et Daniel De Kee.Canadian Society for Chemical Engineering. 27 March 2009
- [12]-Rajadurai, R.S.; Kang, S.-Influence of Inter-Particle Distances on the Rheological Properties of Cementitious Suspensions. Materials 2021,
- [13]-V.H. Nguyen, « Comportement rhéologique et écoulement au cône de Marsh de coulis cimentaires », THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE CERGY – PONTOISE, 2007
- [14]-H. Cambefort, Injection des coulis –Tome I– « Principes et méthodes », Edition Eyrolles. 1964.
- [15]-Construction and Building Materials, 25 October 2024. Gang Peng

[16]-2024 Serra Ciments Pigments, S.L Desde 1940

[17]-GUIDE DE BONNES PRATIQUES POUR L'UTILISATION DES FIBRES DANS LE BETON ». 2005 Association béton Québec. Dépôt légal Bibliothèque nationale du Québec.

[18]-Sika Canada 601 Avenue Delmar H9R 4A9 Pointe-Claire QC

[19]-D.R. Lankard, «Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON) », Concrete International, 1984.

[20]-P.M. Balaguru, and S.P. Shah, «Fiber Reinforced Concrete Composites», McGraw-Hill Inc., New York, 1992.

[21]-J.R. Homrich, and A.E Naaman, «Fiber Reinforced Concrete», ACI SP-105, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1987

[22]-ACI Committee 544, “State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete”, Concrete International, 1982.

[23]-P.M. Balaguru, and S.P. Shah, «Fiber Reinforced Concrete Composites», McGraw-Hill Inc., New York, 1992.

[24]-A.E. Naaman, “Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites”, Journal of Advanced Concrete Technology, 2003.

[25]-Jhatial, Un.; Sohu, S.; Bhatti, N.; Lakhia, M.; Ado, R. de l'Effet des fibres d'acier sur la résistance à la compression et à la flexion du béton. Int.J. L'Inter. Appl. Sci. 2018, 5, 16-21.
[CrossRef]

[26]-Joshi, Un.; Reddy, P.; Kumar, P.; Hatker, P. de travaux Expérimentaux sur l'acier renforcé de fibres de béton. Int. J. Sci. Eng. Rés. à 2016, 7,971-981.

[27]-R. Mondragon, “SIFCON in Compression”, Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1987

[28]-M. Sonebi, L. Svermova, and P.J.M. Batros, “Statistical Modeling of Cement Slurries for Self-Compacting SIFCON Containing Silica Fume”, Materials and Structures Journal. 2005.

[29]-B.T. Wood, B.T, “Use of Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON) in High Regions of Earthquakes Resistant Structures”, Ph.D. Thesis, Civil Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh, 2000.

[30]-Mustafa Faisal Abbas and Khamail Abdul-Mahdi Mosheer 2023 IOP Confr. Earth Environ.

[31]-M.VIJAYAKUMAR¹, P.DINESH KUMAR² PG Student, Department of Civil Engineering, Kongu Engineering College, Erode, India. 2017.

[32]-Aliyaa M. Alsheamari Department of Civil Engineering, University of Kerbala, Iraq.2023

[33]-B. Schneider, R. Mondragon and J. Kirst, “Task Report NMERI”, New Mexico Research Institute, June 1984

[34]-M. Sonebi, L. Svermova, and P.J.M. Batros, “Statistical Modeling of Cement Slurries for Self-Compacting SIFCON Containing Silica Fume”, Materials and Structures Journal. 2005.

[35]- C. Touatia, B. Rouba, “ELABORATION D’UN BETON A INFILTRATION DE COULIS (SIFCON) - EN COLLABORATION AVEC COSIDER-’”, Structure, Faculté des Sciences et de la Technologie. 2019.

Annexes

ALGÉRIE



ماتين MATINE

LAFARGE
Construire
des villes meilleures™



Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT



- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



FORMULATION CONSEILLÉE

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5%
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	< 0,1

Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	8±2

Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

Résistance à la compression

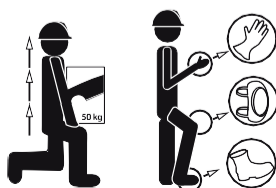
	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

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.

MEMBRE DE
HOLCIM



Conditionnement:



LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.

tél: + 213 (0) 21 98 54 54

Fax: + 213 (0) 23 92 42 94

www.lafargealgerie.com

dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com

Tél: 021 98 55 55

LAFARGE
لافارج