



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 والمعمارية  
Civil engineering & architecture department



N° d'ordre : M ...../GCA/2020

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière :** Génie Civil

**Spécialité :** Structure

### *Thème*

**ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN BETON A  
INFILTRATION DE COULIS (SIFCON)**

**Présenté par :**

- KHEDIMI Adel
- KHOUASS Alaa Eddine

***Soutenu le 24 / 06 / 2020 devant le jury composé de :***

**Président :** BOUHAMOU Nasr Eddine

**Examineur:** BELARIBI Omar

**Encadrant :** BELAS Nadia

**Année Universitaire : 2019 / 2020**

# Remerciements

On remercie tout d'abord **ALLAH TAALA** de nous avoir donné le courage d'entamer et de finir ce mémoire dans de bonnes conditions.

Nous tenons à remercier notre encadrant Madame BELAS, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseignés et qui par leurs compétences nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

On remercie chaleureusement toute l'équipe du département de Génie Civil et d'Architecture 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 ce projet. Un grand merci à nos familles surtout nos parents qui nous ont toujours soutenus, conseillés et aidés. Merci aussi à tous nos amis et nos collègues.

Merci pour tout ce qu'ils nous ont apporté, consciemment ou inconsciemment.

# **Dédicace**

On voudra dédier ce travail à :

Nos chers parents pour lesquelles 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.

Nos chers amis spécialement Karim, Mohamed, Ismail, Chrif, Amir, Amine, Hadj Ahmed, Hakim et Abdellah

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

**KHEDIMI ADEL**

**KHOUASS ALAA EDDINE**

# SOMMAIRE

REMERCIEMENT

DEDICACE

RESUME

ABSTRACT

ملخص

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GEGERALE.....1

## CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE COULIS DE CIMENT

1.1.INTRODUCTION.....3

1.2.LE CIMENT.....3

1.3.L'EAU DE GACHAGE .....3

1.4.LES ADJUVANTS .....3

1.5.LES CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES COULIS .....4

1.5.1.Le Comportement rhéologique du coulis .....4

1.5.2.Seuil de cisaillement .....5

1.5.3.Viscosité .....5

1.5.4.Thixotropie.....5

1.5.5.Décantation.....6

1.6.CONCLUSION.....6

## CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES FIBRES

2.1.INTRODUCTION.....7

2.2.UTILISATION DES FIBRES DANS LE BETON.....7

2.2.1.Amélioration Des Caractéristiques Mécaniques.....7

2.2.2.Contrôle De La Fissuration De Retrait .....7

2.3.AVANTAGES DU BETON FIBRE.....8

2.3.1.Aspect technique .....8

2.3.2.Aspect économique.....8

2.4.APPLICATIONS.....8

<b>2.5.TYPES DES FIBRES ET PROPRIETES .....</b>	<b>9</b>
2.5.1.Fibres synthétiques.....	9
2.5.2.Les microfibres synthétiques.....	9
2.5.3.Les macrofibres synthétiques.....	10
2.5.4.Fibres métalliques.....	10
<b>2.6.CONCLUSION.....</b>	<b>12</b>

## **CHAPITRE 3 CARACTERISTIQUES DU SIFCON**

<b>3.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2. PREPARATION .....</b>	<b>13</b>
<b>3.3. COMPOSITION DU SIFCON.....</b>	<b>15</b>
3.3.1. Les Fibres métalliques.....	15
3.3.2. Matrice de SIFCON.....	16
3.3.3. Les proportions du mélange.....	16
<b>3.4. PROPRIETES PHYSICO MECANQUES DU SIFCON .....</b>	<b>18</b>
3.4.1. Masse volumique.....	18
3.4.2. Résistance à la compression.....	18
<b>3.5. DURABILITE DE SIFCON .....</b>	<b>20</b>
<b>3.6. APPLICATIONS DU SIFCON .....</b>	<b>22</b>
<b>3.7. STRUCTURES RESISTANTES AUX TREMBLEMENTS DE TERRE.....</b>	<b>22</b>
<b>3.8. REPARATION ET MODERNISATION DE COMPOSANTS STRUCTURELS .....</b>	<b>23</b>
<b>3.9. STRUCTURES RESISTANTES AUX EXPLOSIONS.....</b>	<b>23</b>
<b>3.10. AUTRE APPLICATION.....</b>	<b>24</b>
<b>3.11. CONCLUSION .....</b>	<b>24</b>

## **CHAPITRE 4 : RECHERCHE RECENTE SUR LE SIFCON EN ALGERIE**

<b>4.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2. MATERIAUX UTILISES .....</b>	<b>26</b>
<b>4.3. METHODES DE COULIS (CONE DE MARSH) NF P18-358.....</b>	<b>27</b>
<b>4.4. METHODES DE PREPARATION DU SIFCON.....</b>	<b>28</b>
<b>4.5. PRINCIPAUX RESULTATS.....</b>	<b>29</b>
<b>4.6. CONCLUSION.....</b>	<b>31</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>32</b>

# Les Liste Des Figures

## CHAPITRE 2

<b>Figure 2.1</b> : Texture d'un béton fibré .....	8
<b>Figure 2.2</b> : Microfibres Synthétiques .....	10
<b>Figure 2.3</b> : Macrofibres Synthétiques .....	10
<b>Figure 2.4</b> : Géométrie Des Fibres Métalliques .....	11
<b>Figure 2.5</b> : Fibres Métalliques .....	11

## CHAPITRE 3

<b>Figure 3.1</b> : Placement à la main des fibres d'acier dans un moule .....	14
<b>Figure 3.2</b> : Infiltration de coulis aidée par des vibrations externes .....	14
<b>Figure 3.3</b> : Un exemple d'échec de la préparation à cause de manque de fluidité de coulis .....	15
<b>Figure 3.4</b> : Géométrie des fibres métalliques .....	16
<b>Figure 3.5</b> : Effet de la teneur en fibres d'acier sur la masse volumique de SIFCON .....	18
<b>Figure 3.6</b> : Représentation schématique des joints SIFCON dans le système structural .....	22
<b>Figure 3.7</b> : schéma de principe d'une structure de silo durci contenant SIFCON .....	24

## CHAPITRE 4

<b>Figure 4.1</b> : Type de fibres utilisées .....	27
<b>Figure 4.2</b> : Cône de Marsh utilisé dans la méthode du coulis .....	27
<b>Figure 4.3</b> : Les étapes de préparation du mélange .....	28
<b>Figure 4.4</b> : Evolution des résistances à la traction .....	29
<b>Figure 4.5</b> : Aspect des éprouvettes destinées à l'essai de traction .....	30
<b>Figure 4.6</b> : Evolution des résistances à la compression .....	30
<b>Figure 4.7</b> : Aspect des éprouvettes destinées à l'essai de compression .....	30

## **Listes Des Tableaux**

### **CHAPITRE 3**

<b>Tableau 3.1</b> : Modèles de mélanges de SIFCON tirés de la littérature (Par rapport au poids du ciment) .....	17
<b>Tableau 3.2</b> : Conceptions et valeurs de force signalées .....	20
<b>Tableau 3.3</b> : Proportions de mélange en $\text{kg/m}^3$ .....	21

### **CHAPITRE 4**

<b>Tableau 4.1</b> : Caractéristiques physiques du CPJ CEM II 42,5 .....	26
<b>Tableau 4.2</b> : Dosages des constituants pour $1\text{kg/m}^3$ .....	28
<b>Tableau 4.3</b> : Résistances à la compression et à la traction .....	29

## RESUME

Le béton de fibres à infiltration de coulis (SIFCON) est un matériau à haute résistance contenant un pourcentage volumique relativement élevé de fibres d'acier par rapport au béton de fibres normal. Il est aussi parfois appelé «béton fibreux à haut volume». L'origine de SIFCON remonte à 1979, lorsque le professeur Lankard a mené des expériences approfondies dans son laboratoire de Columbus, Ohio, États-Unis et a prouvé que si le pourcentage de fibres d'acier dans une matrice de ciment pouvait être considérablement augmenté, alors, un matériau de très haute résistance pourrait être obtenu et qu'il a baptisé SIFCON.

Le SIFCON est un nouveau type de béton dans notre pays; alors il doit être bien développé et étudié pour l'adopter dans la réalisation des ouvrages spécifiques.

C'est pourquoi cette étude a été menée et dont son objectif de départ est de fournir des informations sur l'élaboration de formulation de ce béton et sur son comportement en traction et en compression. Ces informations aident à fournir une base de données et des connaissances nécessaires sur la capacité du SIFCON à résister à des conditions extrêmes, en particulier lorsqu'il est destiné à résister aux chocs et aux explosions.

Un processus expérimental a été prévu afin d'apporter des améliorations sur la composition du SIFCON élaborée par des étudiants en master de l'année dernière au laboratoire du département de génie civil et d'architecture. Cependant, vu la situation sanitaire que traverse notre pays et précautions oblige, le travail expérimental a été remplacé par une synthèse bibliographique sur le SIFCON suivie de recommandations pour des recherches futures.

**Mots clés :** Fibres – Coulis – SIFCON – Composition – Résistances mécaniques

## **ABSTRACT**

Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON) is a high strength material containing a relatively high volume percentage of steel fibers compared to normal fiber concrete. It is also sometimes called "high volume fibrous concrete". The origin of SIFCON dates back to 1979, when Professor Lankard conducted extensive experiments in his laboratory in Columbus, Ohio, United States and proved that if the percentage of steel fibers in a cement matrix could be considerably increased, then, a material with very high strength could be obtained and which he baptized SIFCON.

SIFCON is a new type of concrete in our country; so it must be well developed and studied to adopt it in the realization of specific constructions.

This is why this study was carried out to provide information on the formulation of this concrete and on its behavior in tension and compression. This information helps to provide a necessary database and knowledge of the ability of SIFCON to withstand extreme conditions, especially when it is intended to withstand shocks and explosions.

An experimental process has been planned to make improvements to the composition of SIFCON developed by last year's master's students at the laboratory of the Department of Civil Engineering and Architecture. However, given the health situation in our country and the precautions required, the experimental work has been replaced by a bibliographic summary on SIFCON followed by recommendations for future research.

**Keywords:** Fibers - Slurry - SIFCON – Composition – Compression Strength

## ملخص

الخرسانة الليفيه مع تسلل الجص (SIFCON) هي مادة عالية القوة تحتوي على نسبة عالية نسبيًا من الألياف الفولاذية مقارنة بالخرسانة الليفيه العادية. كما يطلق عليه أحيانًا "الخرسانة الليفيه عالية الحجم". يعود أصل SIFCON إلى عام 1979 ، عندما أجرى الأستاذ Lankard تجارب مكثفة في مختبره في كولومبوس ، أوهايو ، الولايات المتحدة وأثبت أنه بازياد النسبة المئوية لألياف الفولاذ في مصفوفة الأسمنت يمكن الحصول على مادة ذات مقاومة عالية للغاية أطلق عليها اسم SIFCON.

SIFCON هو نوع جديد من الخرسانة في بلدنا ؛ ثم يجب أن يتم تطويرها ودراستها بشكل جيد لاعتمادها في تحقيق أعمال محددة.

هذا هو سبب إجراء هذه الدراسة لتوفير معلومات عن صياغة تركيبة هذه الخرسانة وعن سلوكها في الشد والضغط. تساعد هذه المعلومات في توفير قاعدة بيانات ضرورية ومعرفة بقدرة SIFCON على تحمل الظروف القاسية ، خاصة عندما يكون الغرض منها هو مقاومة الصدمات و الانفجارات .

تم التخطيط لعملية تجريبية لإدخال تحسينات على مكونات SIFCON الذي طوره طلاب الماستر العام الماضي في مختبر قسم الهندسة المدنية والهندسة المعمارية. ولكن ، نظرًا للحالة الصحية التي تجتاح بلدنا و التدابير الوقائية المتخذة ، تم استبدال الاحتياطات اللازمة للعمل التجريبي بملخص ببليوغرافي حول SIFCON متبوعًا بتوصيات للبحوث المستقبلية.

**الكلمات المفتاحية :** الألياف - الجص - SIFCON - مكونات - المقاومة الميكانيكية

## INTRODUCTION GENERALE

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 (1).

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 (2).

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 (2).

En raison de sa haute teneur en fibres, le SIFCON a une qualité unique et des propriétés mécaniques de résistance et de ductilité intéressantes(2).

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'agrégats 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.

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 (3).

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.

Ce projet innovant concerne l'élaboration du SIFCON à base des fibres métalliques. Nous n'avons au départ aucune base de recherche sur ces produits sur laquelle s'appuyer. En effet, il n'existe pas ou très peu de travail de recherche à ce sujet localement.

L'objectif de ce travail a été d'élaborer des SIFCON dans lesquels sont incorporés une proportion de sable équivalente à celle du ciment et deux teneurs de fibres métalliques à savoir 5 et 7%.

Cette étude a été scindée en trois principaux chapitres :

Le premier chapitre décrits les différents constituants du coulis, les mécanismes d'action et sa caractérisation.

Dans le deuxième chapitre des notions générales sur les fibres ont été présentées, leurs

domaines d'utilisation, leurs caractéristiques mécaniques, avantages et types.

La description d'un nouveau type de béton nommé a été donnée par le troisième chapitre, dans lequel il a été sa composition, propriétés physico – mécaniques (masse volumique, résistance à la compression) et sa durabilité et ensuite ses applications.

Quant au dernier chapitre, une recherche récente sur le SIFCON et unique en Algérie a été résumée.

A la fin du mémoire une conclusion générale comprenant les principales informations tirées de ce travail et des recommandations à suivre pour mettre en exécution le programme expérimental établi au départ.

**CHAPITRE 1 :**  
**GENERALITES SUR LE COULIS DE CIMENT**

## 1.1 INTRODUCTION

Les coulis de ciment sont des matériaux fluides, économiques et faciles à utiliser dans un large choix d'applications. (Réhabilitation, pose de coques, tubage, comblement, liaisons électriques, géothermie ...). Ils sont composés de ciment, eau et adjuvant (4).

## 1.2 LE CIMENT

Le ciment est une matière pulvérulente formant avec l'eau une pâte liante capable d'agglomérer en durcissant des substances variées, Dans le présent contexte, le terme de ciment désigne par défaut un liant hydraulique qui fait prise au contact de l'eau par hydratation, Il existe des ciments spéciaux qui possèdent des propriétés spécifiques de prise ou de résistance : ciment alumineux fondu, ciment prompt naturel...régis par des normes spécifiques. Le ciment est gris le plus souvent mais il existe des ciments blancs composés à partir de matières premières sans oxyde de fer (5).

## 1.3 L'EAU DE GACHAGE

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, votre béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées (6).

## 1.4 LES ADJUVANTS

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5 % du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés Ou du comportement de ceux –ci (7).

Pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de liquides (7).

Un adjuvant n'est pas un palliatif. Il n'a ni pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de se substituer aux règles de la bonne technique (7).

Un adjuvant a, en général, une action principale d'après laquelle il se trouve classé et défini, mais il peut présenter également certaines actions secondaires que l'on appelle généralement « effets secondaires ».

Les normes européennes retiennent la classification suivante :

- plastifiants réducteurs d'eau.
- super plastifiants hautement réducteurs d'eau,
- rétenteurs d'eau.

- entraîneurs d'air.
- accélérateurs de prise.
- accélérateurs de durcissement.
- retardateurs de prise.
- hydrofuges.

Certains adjuvants peuvent avoir plusieurs de ces fonctions. On parle alors, de fonction principale et de fonction secondaire. Exemple : plastifiant réducteur d'eau (ou super plastifiant hautement réducteur d'eau) et retardateur (7).

Les adjuvants utilisés dans les coulis sont les superplastifiants (7).

### 1.5 LES CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES COULIS

Les coulis sont généralement des liquides ou des suspensions cimentaires. Ils sont injectés sous pression, doivent permettre de remplir des fissures, cavités ou interstices des terrains afin d'améliorer la performance mécanique ou les caractéristiques hydrauliques du milieu traité.

Les caractéristiques à définir pour un coulis sont :

- A l'état frais, la viscosité, la thixotropie, le seuil de cisaillement et la stabilité.
- A l'état durci, la résistance mécanique est le facteur important pour caractériser des propriétés mécaniques des coulis, mais elle n'est recherchée que pour des scellements d'ancrages ou pour certaines consolidations dépendant des conditions d'utilisation des coulis. Une bonne résistance à l'arrachement est également nécessaire pour des coulis de scellement. Il doit en outre résister dans le milieu agressif(8).

#### 1.5.1 Le Comportement rhéologique du coulis

La connaissance du comportement rhéologique des coulis à l'état frais est très importante et nécessaire à la compréhension de leur écoulement lors de la mise en œuvre. Les propriétés rhéologiques du coulis peuvent varier suivant la température, la durée entre le malaxage et la mise en œuvre, le temps de malaxage du coulis, la nature des composantes ou le rapport Eau/Ciment. Deux critères limitent la pénétration des coulis dans un terrain [Caron, 1995] :

- 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.

La deuxième raison qui est conditionnée par le comportement rhéologique des coulis. En laboratoire, le comportement rhéologique des coulis peut être déterminé de manière précise et complète à l'aide des rhéomètres qui permettent d'identifier la loi de comportement et donc les caractéristiques rhéologiques des coulis cimentaires.

Par ailleurs, dans la pratique industrielle de l'injection, on utilise le cône de Marsh qui est un outil simple normalisé pour caractériser rapidement et globalement la fluidité des coulis par la mesure de leur temps d'écoulement.

Enfin, s'il est primordial que les coulis puissent pénétrer le milieu du terrain, ceux-ci doivent également assurer une décantation suffisamment faible. Les coulis ne devront pas s'essorer trop rapidement et rester stable jusqu'à la prise(8).

### 1.5.2 Seuil de cisaillement

Durant une injection d'eau ou de coulis, si celle-ci est arrêtée, la pression va diminuer et l'écoulement va s'arrêter. Par la suite, lorsqu'on applique à nouveau la pression, l'eau se remet à s'écouler immédiatement puisqu'elle n'a aucun seuil de cisaillement, alors que le coulis de son côté, exige une pression substantielle avant de recommencer à s'écouler : ceci caractérise un seuil de cisaillement. Le seuil de cisaillement des suspensions de coulis s'explique par la liaison entre les particules solides. Pour que le coulis s'écoule, il faut lui exercer une contrainte de cisaillement suffisamment élevée pour casser la liaison entre les grains de coulis. Il existe donc une valeur minimale de la contrainte de cisaillement pour initialiser l'écoulement des coulis. Cette valeur minimale est appelée seuil d'écoulement.

Le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le fluide s'écoule.

Le seuil d'écoulement des coulis dépend de la concentration volumique, et de la finesse des grains de coulis. Plus la concentration et la finesse des grains de coulis sont élevées, plus le seuil d'écoulement augmente (8).

### 1.5.3 Viscosité

La viscosité est une grandeur physique qui joue un rôle important dans le comportement rhéologique. Sa connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du matériau. La viscosité du coulis peut être évaluée par deux méthodes de mesure :

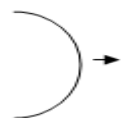
- Le temps d'écoulement au cône (s) : il caractérise l'aptitude à l'écoulement des coulis.
- Le viscosimètre à cylindres coaxiaux (Pa) Suivant la consistance des coulis, l'un ou l'autre des diamètres d'ajutage suivants peut être utilisé :

➤ ajutage de 4,75mm (cône de Marsh) pour les Coulis Fluides (8)

➤ ajutage de 8 mm

➤ ajutage de 10 mm

➤ ajutage de 14 mm



Coulis Chargés (8)

### 1.5.4 Thixotropie

Lorsque le coulis est soumis à une contrainte de cisaillement suffisamment élevée (supérieure au seuil d'écoulement), la liaison entre les grains du coulis est cassée et les particules sont dispersées en grains isolés ou en petits flocs indépendants. Si le mouvement continue, les flocs se dispersent en raison des forces de frottement et des chocs exercés par les grains ou les

flocs adjacents. Par conséquent, la contrainte de cisaillement nécessaire pour maintenir l'écoulement diminue. Ceci correspond au fait que la viscosité du coulis diminue. Néanmoins, lorsque la contrainte de cisaillement appliquée diminue, les nouveaux flocs peuvent être reformés entre les grains isolés ou avec les flocs existants par la force d'attraction entre les grains ou les flocs. 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. Il existe plusieurs des définitions de la thixotropie dans la littérature scientifique(8).

### 1.5.5 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.

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.

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

Où :

- V : volume d'eau de ressuée
- $V_0$  : 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 exsudation faible. D'après [Cambefort et al., 1964], 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(8).

## 1.6 CONCLUSION

On conclut dans ce chapitre les différents constituants du coulis, les mécanismes d'action et sa caractérisation. L'étude du comportement rhéologique des coulis de ciment est intéressante à cause non seulement de leur utilisation comme un moyen de réparation mais également pour la relation de cette étude avec les propriétés du béton frais. Les caractéristiques du ciment qui influencent la consistance, la maniabilité et l'affaissement du béton sont d'un intérêt universel. Il est important de comprendre comment contrôler les propriétés rhéologiques des coulis de ciment pour pouvoir mieux arriver à une formulation de béton idéale, tant sur la qualité que sur l'économie ainsi que sa mise en œuvre facile et adéquat(8).

**CHAPITRE 2**  
**GENERALITES SUR LES FIBRES**

### 2.1 INTRODUCTION

Un béton fibré est un matériau composite associant une matrice (le béton) et un renfort (les fibres). Les fibres ont pour rôle principal de maîtriser la fissuration et de reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles. Elles confèrent au béton des performances et des propriétés liées à leur nature, leurs formes et à leurs caractéristiques mécaniques. Le spectre des utilisations des bétons fibrés est devenu extrêmement large. Les bétons fibrés enrichissent l'éventail des solutions constructives en béton, grâce au développement continu d'une gamme de fibres aux propriétés multiples.(9)

### 2.2 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(10).

#### 2.2.1 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 (10).

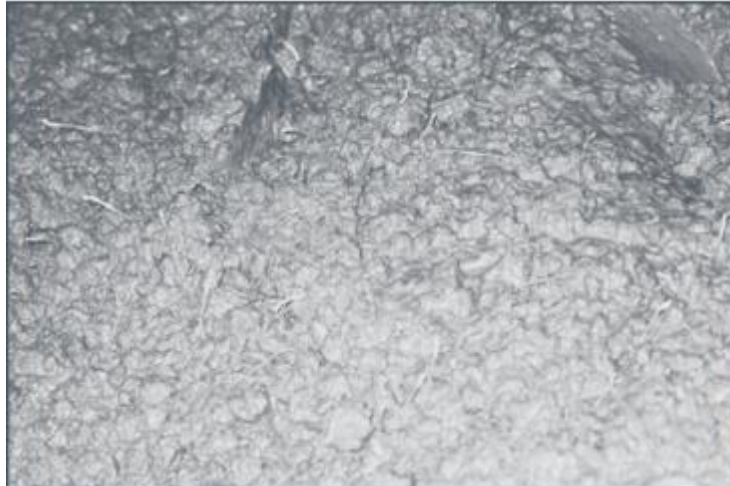
L'augmentation de la capacité en flexion est obtenue grâce à l'augmentation de la résistance résiduelle par l'utilisation des fibres. Cette propriété est aussi fonction de la nature, de la quantité et de l'efficacité des fibres utilisées. Il est important de se rappeler que la distribution uniforme des fibres dans le mélange est la condition essentielle pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré (10).

#### 2.2.2 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(10).

Pour optimiser le contrôle de la fissuration, les fibres doivent être distribuées de manière homogène dans le béton tout en ayant un dosage adéquat (figure 2.1). L'utilisation de fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique (10).

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 (10).



**Figure 2.1** : Texture d'un béton fibré

### 2.3 AVANTAGES DU BETON FIBRE

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique (10).

#### 2.3.1 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(10):

- 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

#### 2.3.2 Aspect économique :

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont(10):

- 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

### 2.4 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(8).

### 2.5 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(8) :

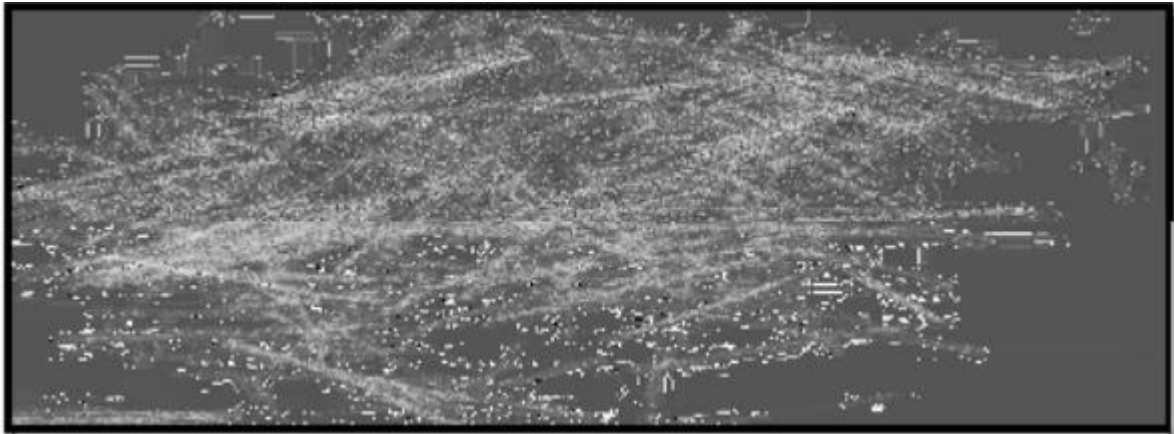
- synthétique (acrylique, aramide, carbone, nylon, polyester, polyéthylène et polypropylène).
- naturelle (bagasse, noix de coco, jute, maguey, banane, palmier et bambou).
- métallique (inoxydable, galvanisé, fil étiré à froid, tôle découpée, extrusion de matière fondue).
- verre (sodocalcique, borosilicaté, Cem-Fil et NEG).

#### 2.5.1 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 (8). L'appendice H de la norme CSA A23.1 classe les fibres synthétiques en deux catégories selon leur dimension : les microfibres synthétiques et les macrofibres synthétiques (8).

#### 2.5.2 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 2.2). 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 (8).



**Figure 2.2 :** Microfibres Synthétiques

### 2.5.3 Les macrofibres synthétiques

Ces fibres sont en forme de filaments grossiers (Figure 2.3). 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 (8).



**Figure 2.3 :** Macrofibres Synthétiques

### 2.5.4 Fibres métalliques

Les fibres métalliques sont de types et de formes variées et présentent une très bonne compatibilité avec le béton. La Figure 2.4 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)(8).

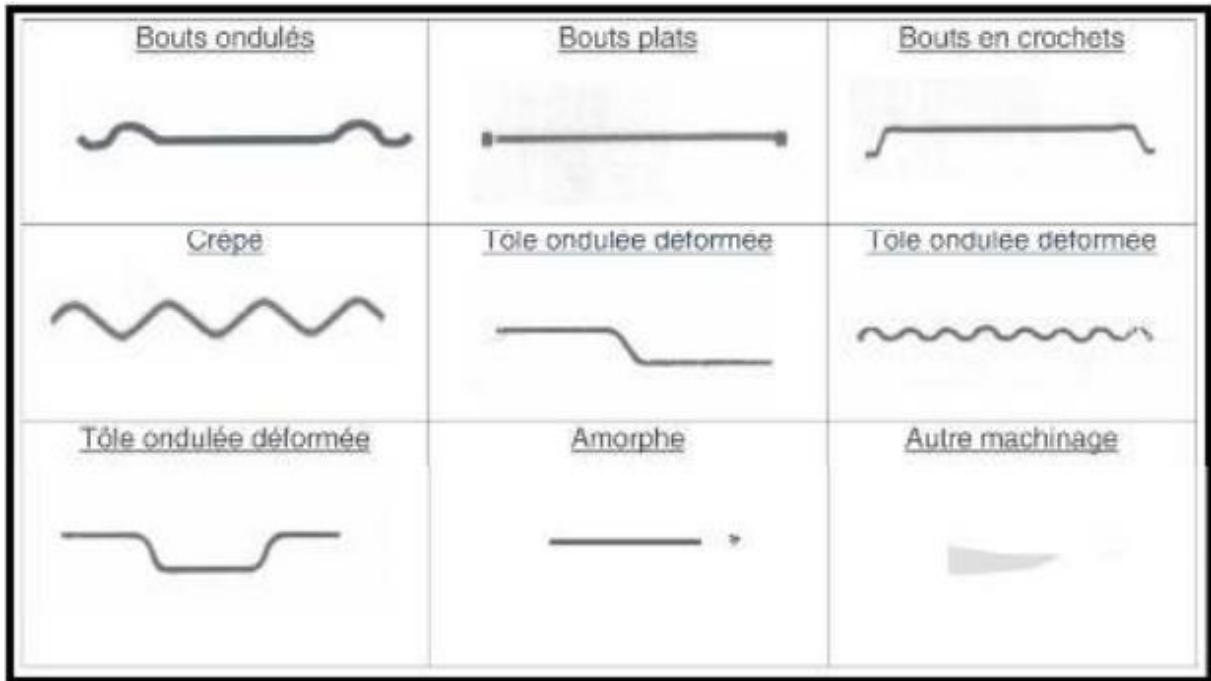


Figure 2.4 : Géométrie Des Fibres Métalliques

La norme ASTM A 820 identifie cinq types de fibres métalliques(8) :

- 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 (8)(Figure 2.5)

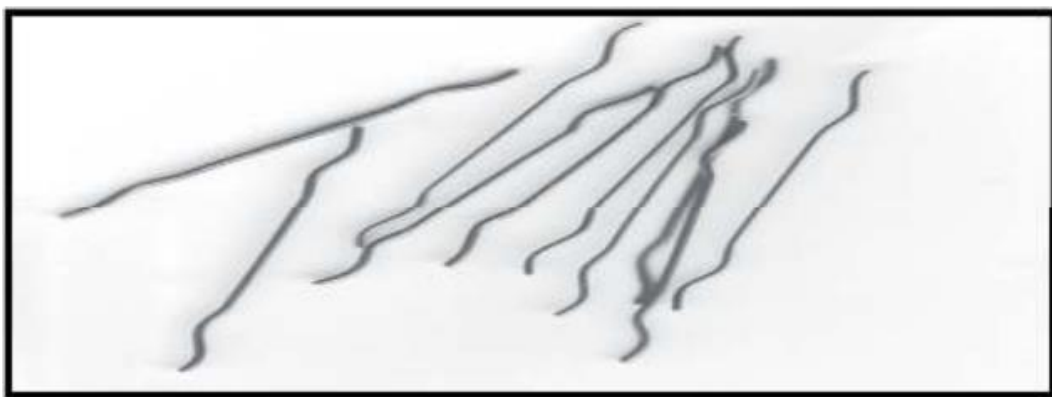


Figure 2.5 :Fibres Métalliques

### 2.6 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 (8).

**CHAPITRE 3 :**  
**CARACTERISTIQUES DU SIFCON**

### 3.1. INTRODUCTION

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 (11).

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 (12).

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 (12).

En raison de sa haute teneur en fibres, le SIFCON a une qualité unique et des propriétés mécaniques de résistance et de ductilité intéressantes(12).

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'agrégats 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.

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 (13).

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.

### 3.2. PREPARATION

Le réseau de fibres placées à la main dans le moule (Figure 3.1) est infiltré par un coulis liquide à base de ciment ou de mortier. Le moule est ensuite soumis à la vibration grâce à une table vibrante pour assurer la bonne dispersion des fibres dans la matrice du coulis (Figure 3.2).



**Figure 3.1 :** Placement à la main des fibres d'acier dans un moule



**Figure 3.2 :** Infiltration de coulis aidée par des vibrations externes

Le choix de la technique d'infiltration est largement dicté par la facilité avec laquelle le coulis déplace à travers les fibres. La Figure 3.3 montre un exemple de ce qui se passe si le coulis n'est pas assez fluide, ou si la vibration n'est pas assez intense.



**Figure 3.3 :** Un exemple d'échec de la préparation à cause de manque de fluidité de coulis

### 3.3. COMPOSITION DU SIFCON

Les matériaux constituants 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).

Dans la plupart des cas, des adjuvants haut réducteurs d'eau (superplastifiants) sont utilisés afin d'améliorer la fluidité de coulis et assurer une infiltration complète sans augmenter le rapport eau-ciment (E/C). La posologie du superplastifiant a le plus d'effet sur la fluidité, la cohésion et la pénétrabilité des coulis de ciment.

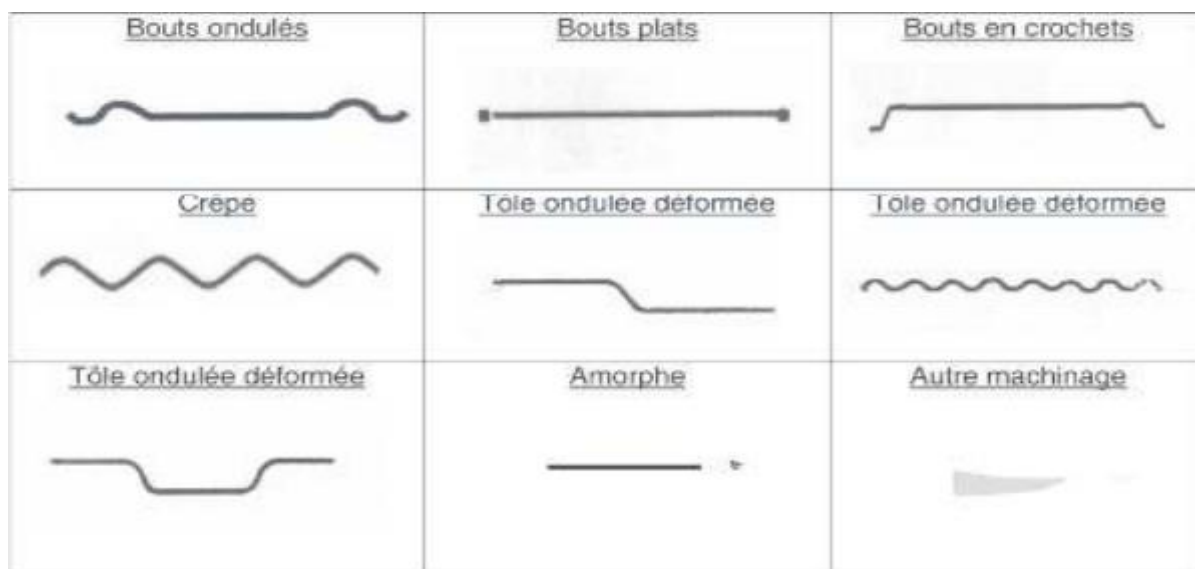
#### 3.3.1. Les Fibres métalliques

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 (14-15).

Dans la plupart des cas, la section transversale des fibres d'acier est circulaire. Il peut aussi être rectangulaire, carré, triangulaire ou plat (16).

Des exemples typiques de fibres d'acier utilisés pour le SIFCON sont indiqués sur la (Figure 3.4). Dans la plupart des applications aux États-Unis et en Europe, des fibres d'acier à extrémités crochetés ont été utilisées (13).

Les plus communes des fibres d'acier ont une longueur de 25 à 60mm, et un diamètre allant de 0,4 à 1mm. 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 (17).



**Figure 3.4 :** Géométrie des fibres métalliques

### 3.3.2. 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 (14, 18, 19,20). Matrices contenant des additions minérales telles que cendres volantes ou les fumées de silice ont montré un meilleur comportement au retrait (13). L'addition de fumée de silice augmenterait la résistance, alors que l'addition de cendres volantes entraîne une certaine réduction de la résistance (21). De plus, une augmentation de la proportion de sable augmenterait la résistance à la compression.

### 3.3.3. 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 (12, 11,14).

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) (13).

Le Tableau3.1 montre certaines conceptions du mélange tirées de 11 études différentes portant sur le SIFCON (14, 18, 19,20).

## CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUES DU SIFCON

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

Référence N°	Composition de SIFCON				
	Ciment <sup>(1)</sup>	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.

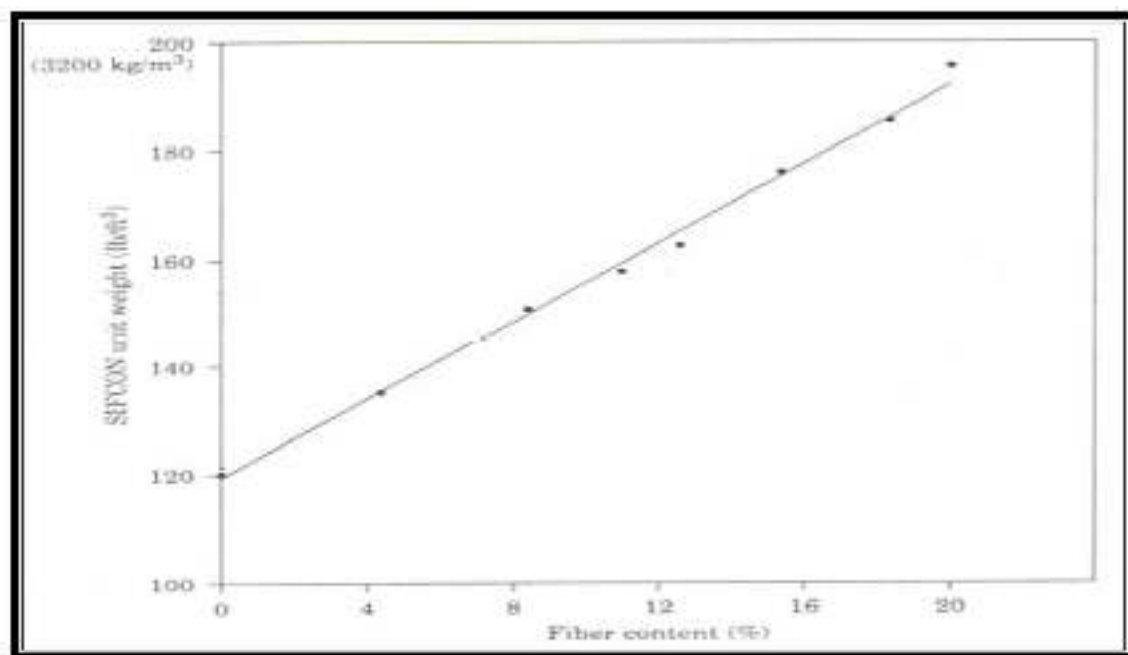
(2) Dans toutes les références, des cendres volantes ont été utilisées, à l'exception de la référence 6 où il s'agit de la fumée de silice

Comme on peut le voir sur le Tableau 3.1, l'utilisation du mortier est plus fréquente que le coulis pour faire le SIFCON. La proportion de sable varie de 0,2 à 2, et il est égal à 1 dans la plupart des cas. L'ajout de cendres volantes est également noté pour améliorer les propriétés du mélange. Dans la majorité des mélanges, l'utilisation de superplastifiants est inévitable en raison du rapport E/C relativement faible, et de la nécessité de produire un mélange très fluide.

### 3.4. PROPRIETES PHYSICO – MECANQUES DU SIFCON

#### 3.4.1. Masse volumique

La masse volumique de SIFCON est généralement plus élevée que celle du béton et béton renforcé de fibres normal (BRC) en raison du poids élevé des fibres de leur teneur importante. La masse volumique moyenne du coulis est estimé à  $1920 \text{ kg/m}^3$ , l'ajout de 5 à 20% de fibres d'acier augmente la masse volumique de 2160 à  $3130 \text{ kg/m}^3$ , une augmentation presque linéairement proportionnelle à la teneur en fibres, comme le montre la (Figure 3.5)(12).



**Figure 3.5 :** Effet de la teneur en fibres d'acier sur la masse volumique de SIFCON

#### 3.4.2. Résistance à la compression

Le SIFCON est connu pour sa haute résistance à la compression. La valeur la plus élevée rapportée pour SIFCON est de 210 MPa(12).

Le composite est également très ductile par rapport à une matrice ordinaire. Le comportement à la compression du SIFCON a fait l'objet de mesures sur des éprouvettes cylindriques, et les variables étudiées incluaient (12, 14,21) :

- Effet d'orientation des fibres : parallèle et perpendiculaire à l'axe de chargement.
- Géométrie des fibres : extrémités à crochets, ondulée et déformée.

## CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUES DU SIFCON

---

- Composition de la matrice : matrice de ciment ordinaire, matrice contenant du sable ou de la cendre volante, de la fumée de silice ou de leurs combinaisons.

La résistance du SIFCON dépend de la conception du mélange, de la résistance de la matrice, de l'orientation, la fraction de volume et la géométrie des fibres. Le Tableau 3.2 présente les intervalles des résistances à la compression obtenue sur des SIFCON (14).

La résistance de SIFCON peut être 2 fois plus supérieure que celle d'une matrice ordinaire. Une augmentation de la résistance de la matrice entraîne une augmentation de celle du SIFCON. Les géométries des fibres ont montré moins d'influence que la résistance du béton.

## CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUES DU SIFCON

**Tableau 3.2 : Conceptions et valeurs de force signalées**

Mélange N°	Les constituants des mélanges	Dosage des matériaux	E/C <sup>(1)</sup> (%)	Les intervalles des résistances (MPa)
1	Ciment type I	1	0.30	52 à 117
	cendres volantes	0.2		
	Eau	0.36		
	SP	0.03		
2	Ciment type I	1	0.35	41 à 93
	cendres volantes	0.20		
	Fumé de silice <sup>(2)</sup>	0.20		
	Eau	0.355		

	SP	0.02		
3	Ciment type I	1	0.30	41 à 86
	cendres volantes	0.20		
	Fumé de silice <sup>(2)</sup>	0.30		
	Eau	0.255		
	SP	0.04		
4	Ciment type I	1	0.26	69 à 121
	cendres volantes	0.25		
	Eau	0.325		
	SP	0.04		

<sup>(1)</sup> E/C est le rapport eau/ (ciment+ cendres de volantes+fumée de silice).

<sup>(2)</sup> Un coulis d'environ 50 % d'eau et 50 % de particules siliceuses en masse.

### 3.5. DURABILITE DE SIFCON

Très peu d'informations sont disponibles dans la littérature sur les aspects de durabilité du SIFCON. Les seules informations disponibles étaient uniquement sur le retrait dû au séchage et la résistance au gel dégel.

## CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUES DU SIFCON

Les travaux de recherche entrepris dans le domaine de la durabilité des composites de béton renforcé de fibres de haute performance (BRFHP) sont assez limités, et ne couvre que peu de types de bétons : béton renforcé de fibres normales (BRF) avec fumée de silice mélangée au ciment et béton de poudre réactive (BRP) (22).

Aussi, très peu sont les recherches portent sur certains aspects de la durabilité du SIFCON (11, 12, 13).

Cependant, la dégradation des structures en béton est engendrée beaucoup plus par des problèmes de durabilité des éléments en béton que de leur résistance.

Par conséquent, la durabilité, de BRFHP en général et SIFCON en particulier, semble être un domaine sous-estimé de la recherche.

Une étude réalisée sur le SIFCON par Gilani en 2007 traite des aspects de variation de durabilité de ce type de béton.

Il a étudié trois types de compositions en faisant varier le type de fibres (à crochet et ondulées) et leurs dosages (7, 9.5 et 12%). Les proportions en kg/m<sup>3</sup> des trois mélanges en masse sont données dans le Tableau 3.3. Les trois mélanges représentent les deux types communs de matrices utilisées pour SIFCON, le coulis ou pâte (M1) et le mortier (M2), en plus d'un mélange de contrôle de béton ordinaire (M3).

**Tableau 3.3** : Proportions de mélange en kg/m<sup>3</sup>

Les mélanges	Ciment	Eau	Sable	Graviers	SP
M1	1356.3	452.5	-	-	-
M2	885.1	34.1	885.1	-	10.6
M3	475.0	190.0	725.0	960.0	7.1

Il a été constaté que la valeur limite minimale du taux de fibres qui remplit les moules sans l'utilisation de vibrations est d'environ 7 %. En revanche, la fraction de volume de 12 % a été comme limite pratique maximale, même avec des vibrations intenses. Le dosage de 9,5 % a été pris comme valeur intermédiaire à introduire au SIFCON avec une vibration légère pendant le placement des fibres dans les moules.

Les résultats obtenus indiquent que SIFCON, surtout lorsqu'il est préparé à mortier, a montré de bonnes caractéristiques de durabilité en dépit de son absorption d'eau élevée apparente.

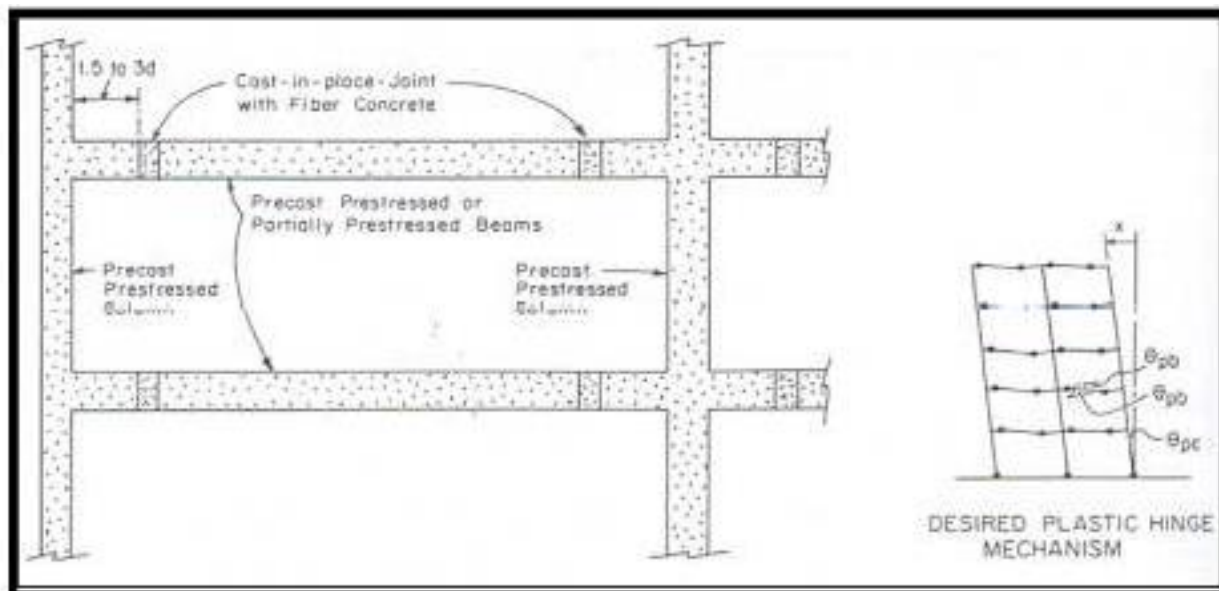
### 3.6. APPLICATIONS DU SIFCON

Bien que le SIFCON soit encore un matériau relativement nouveau, le composite a été utilisé avec succès dans un certain nombre de domaines, en particulier pour les applications où des hautes ductilités sont nécessaires. Il s'agit notamment d'une grande variété de structures résistantes aux tremblements de terre, installations militaires, structures imperméables et résistantes aux explosions. En plus de nombreuses autres utilisations dans l'aéroport, trottoirs, parkings et ponts. Voici quelques-unes des applications réussies de SIFCON rapportées dans la littérature. La plupart d'entre eux ont été appliquées aux États-Unis depuis le début des années 1980.

### 3.7. STRUCTURES RESISTANTES AUX TREMBLEMENTS DE TERRE

L'utilisation de SIFCON dans les régions articulées des structures résistantes aux tremblements de terre a été examinée (20). 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.

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 (19). La (Figure 3.6). Illustre l'application désassemblages SIFCON dans des cadres résistants aux séismes.



**Figure 3.6 :** Représentation schématique des joints SIFCON dans le système structural

### 3.8. REPARATION ET MODERNISATION DE COMPOSANTS STRUCTURELS

Le SIFCON sert d'excellent matériau de réparation car il est compatible avec le béton armé en termes de rigidité et de changements dimensionnels causés par la température. Il peut être placé dans des endroits difficiles à atteindre et fournit de bonnes liaisons au béton parent en raison de la présence de fibres. La matrice peut être modifiée en fonction de la réparation en question. Par exemple, un gain de force rapide peut être obtenu à l'aide d'accélérateurs (22).

Le SIFCON a été utilisé pour réparer les poutres en béton précontraint couvrant une route au Nouveau-Mexique, États-Unis. Les poutres avaient été endommagées par le passage de véhicules sous le pont. Certains des tendons précontraints ont été dégradés. Les poutres ont été restaurées, en utilisant le SIFCON, sans les enlever.

La restauration sur place peut non seulement entraîner une grande économie de coûts, mais également réduire le temps de réparation de quelques mois. Les résultats ont été satisfaisants jusqu'à 8 ans après la réparation (12).

### 3.9. STRUCTURES RESISTANTES AUX EXPLOSIONS

En raison de sa forte résistance à la flexion et à la compression, combinée à une forte ductilité, le SIFCON est envisagé pour une utilisation dans des structures pour résister à l'effet de charge explosive (12, 23).

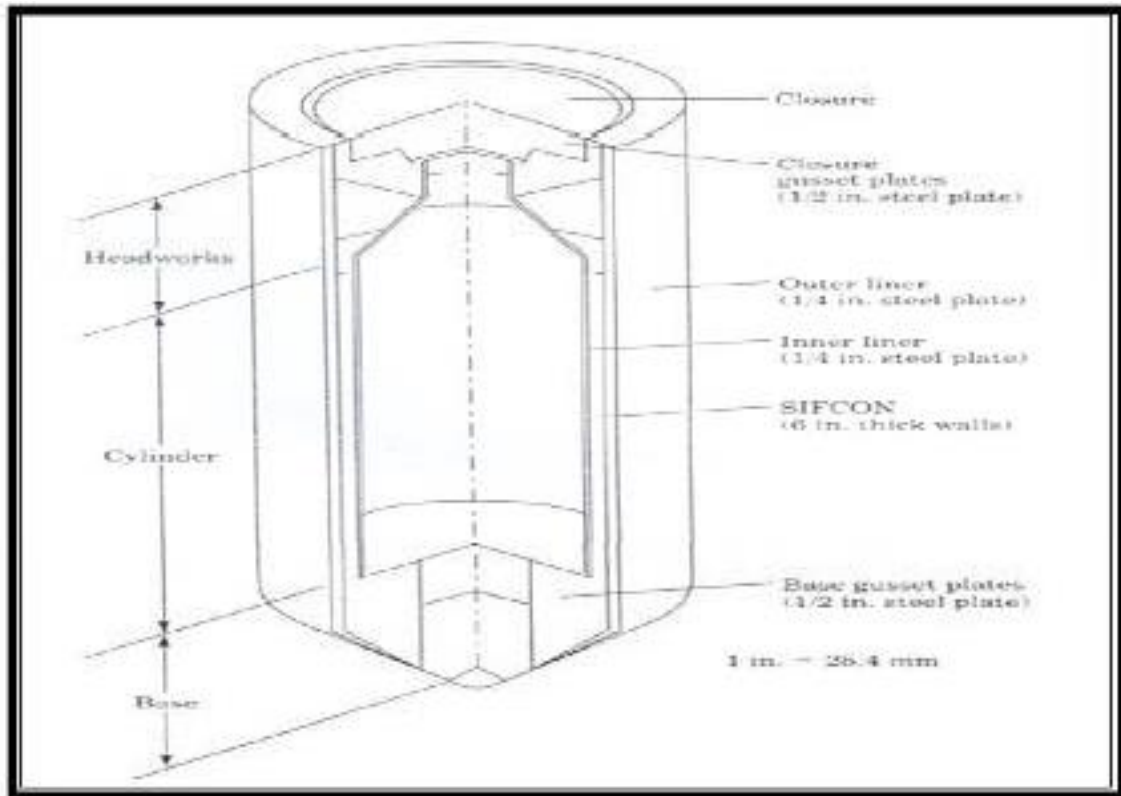
Par exemple, il a été utilisé pour faire des conteneurs pour stocker divers types de munitions. La principale préoccupation de cette application est de limiter la propagation des explosions d'un conteneur vers un autre. Le SIFCON a été utilisé pour les structures de silo de missiles (23).

Un modèle des structures de silo à missiles a été construit par le nouvel Institut de recherche du Mexique, (Figure 3.7). Le silo était de 6 m de hauteur, avec 15 cm de parois SIFCON entre deux plaques d'acier de 6 mm d'épaisseur.

Premièrement, les sections intérieures et extérieures de la doublure en acier ont été entièrement érigées en 1,5 m de longues sections. Ensuite, les fibres d'acier ont été placées entre les doublures et puis le coulis a été infiltré à l'aide de vibrations externes dans 1,5 m en remontée et descente pour obtenir un composite correctement compacté.

Après la construction, la structure de silo entièrement instrumentée a été soumise à la charge explosive. La performance de la structure SIFCON dans ce test a été jugée excellente et a même dépassé les attentes (23).

SIFCON a également démontré une excellente résistance à la pénétration des projectiles.



**Figure 3.7 :** schéma de principe d'une structure de silo durci contenant SIFCON

### 3.10. AUTRE APPLICATION

Cette application est liée à la sécurité, comme les portes de coffre et les coffres forts, le produit doit être d'excellente résistance contre le dynamitage, le torchage, le perçage et l'écaillage. Le béton armé et l'acier ont tous les deux certaines faiblesses. Par exemple, l'acier et les parois peuvent être incendiés ou percés.

L'utilisation de SIFCON dans cette application a démontré ses avantages par rapport au béton et l'acier. Les parois SIFCON ne peuvent pas être incendiées car le béton résiste à la détérioration par la chaleur et ralentit également la conduction de la chaleur. Le composite a résisté à la charge de l'explosion en raison de sa ductilité élevée. Le forage est très difficile en raison des intrusions de fibres. Par conséquent, SIFCON est utilisé avec succès pour différents types de portes coffres-forts.

### 3.11. CONCLUSION

On conclut dans ce chapitre les différents constituants de SIFCON, les mécanismes d'action et sa caractérisation physico-mécanique (la masse volumique et la résistance à la compression).

Ce nouveau type de béton est réalisé dans les grandes structures pour résister à l'effet de chargement explosif grâce à sa haute teneur en fibres. Pour les effets de la teneur en fibres, il a été constaté que leur augmentation améliore la durabilité du SIFCON.

D'autre part, il n'y avait pas de relations entre la forme de la fibre et les aspects de durabilité étudiés ; les fibres à crochet ont montré de meilleurs résultats.

De plus, 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.

**CHAPITRE 4 :**  
**RECHERCHE RECENTE SUR LE SIFCON EN**  
**ALGERIE**

### 4.1. INTRODUCTION

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 (24) et ce en collaboration avec COSIDER. Elle a été menée au département de génie civil et d'architecture de l'université de Mostaganem. Ce chapitre résume cette étude unique en son genre qui avait pour but de maîtriser l'élaboration du SIFCON qui a rencontré quelques difficultés et par la suite étudier le comportement mécanique de ce béton exceptionnel.

### 4.2. MATERIAUX UTILISES

Un ciment Port landau calcaire CPJ/NA442CEMII/BL42,5N provenant de la cimenterie de LAFARGE sous le nom commercial «Matine».

Les caractéristiques physiques du ciment sont données par le tableau 4.1.

**Tableau 4.1** : Caractéristiques physiques du CPJ CEM II 42,5

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique apparente (g/ cm <sup>3</sup> )	1,7
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3
Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4425
Teneur en eau de la pâte (ml)	138

L'adjuvant qui a été utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau de dernière génération **CHRYSO® FLUID Optima 208 A**, de densité  $1,070 \pm 0,020$  et d'extraits secs  $25,10\% \pm 1,50\%$ . Les fibres qui ont été choisies sont des « **Dramix®45/50BL (Acier nu Libre)** » (**Figure 4.1**) 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 et résidentiels.

Elles ont une longueur (l) de 50mm, un diamètre (d) de 1,05mm et un élanement (l/d) de 45. Leur masse volumique est de  $7,6 \text{ g/cm}^3$ .



Figure 4.1 : Type de fibres utilisées

### 4.3. METHODES DE COULIS (CONE DE MARSH) NF P18-358

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. Le but est de définir le dosage de saturation du superplastifiant qui sera adopté dans la composition du SIFCON.

Le cône de Marsh (Figure 4.2) 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  $31.5 \pm 0.5$  secondes pour l'eau.

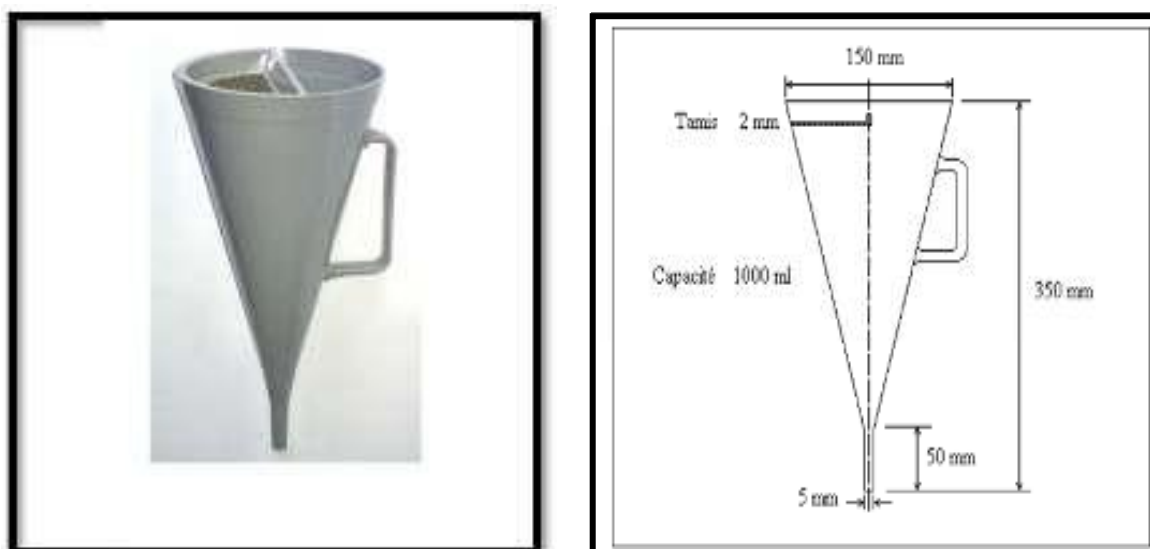


Figure 4.2 :Cône de Marsh utilisé dans la méthode du coulis

Les résultats de cette étude sur le coulis a montré que le dosage de saturation de l'adjuvant a

été de 1%.

### 4.4. METHODES DE PREPARATION DU SIFCON

Le Tableau 4.2 donne la formulation du SIFCON qui a été adoptée.

**Tableau 4.2 : Dosages des constituants pour 1kg/m<sup>3</sup>**

E/C	Ciment (Kg)	Eau (Kg)	SP (%)	Super plastifiant (Kg)	Fibres métalliques (%)
0.25	1959	489,8	1	19,59	5

Le processus 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 faire l'introduction du coulis de ciment. Dans cette méthode le rapport E/C = 0,25.

Dans ce programme expérimental, un seul type de moule a été utilisé; les éprouvettes prismatiques normalisées (NF P 18-400, NA2600) de dimensions 7x7x28 cm pour la détermination des résistances à la flexion 3 points et à la compression.

Les étapes de préparation du mélange sont représentées dans la figure 4.3.



**Figure 4.3 : Les étapes de préparation du mélange**

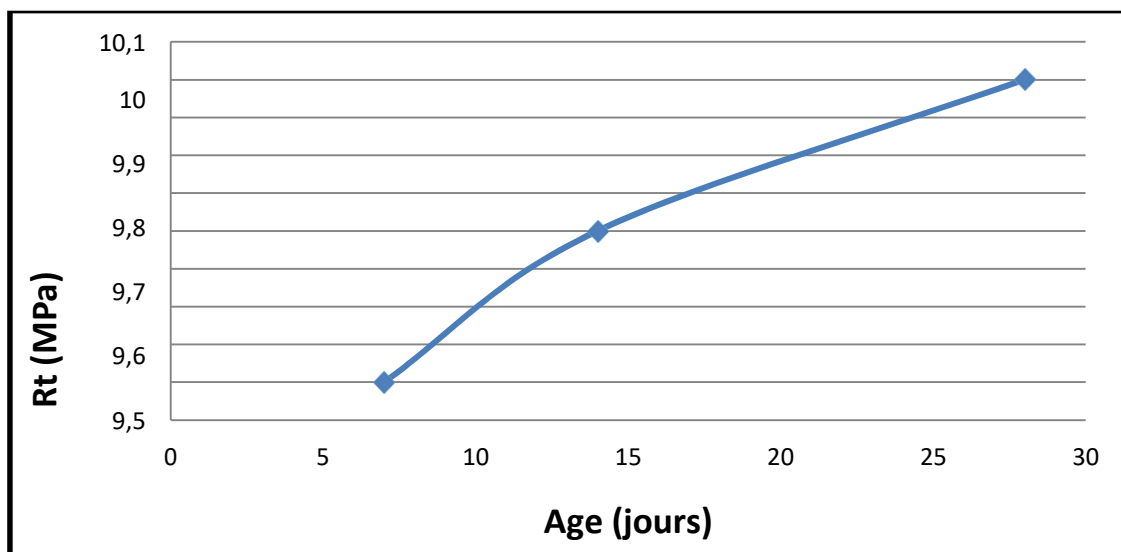
#### 4.5. PRINCIPAUX RESULTATS

Les masses volumiques mesurées qui ont été mesurées sur les éprouvettes de SIFCON sont supérieures à  $2200 \text{ Kg/m}^3$  (masse volumique d'un béton ordinaire) ce qui les qualifie de bétons denses et par conséquent résistants.

Les résultats des résistances à la traction et à la compressions ont représentés dans le Tableau 4.3 et les (Figure 4.4 et 4.6).

**Tableau 4.3 :** Résistances à la compression et à la traction

Eprouvettes (7x7x28)		
Age (jours)	Compression (MPa)	Traction (MPa)
7 jours	70	9.2
14 jours	87.5	9.6
28 jours	90	10



**Figure 4.4:** Evolution des résistances à la traction

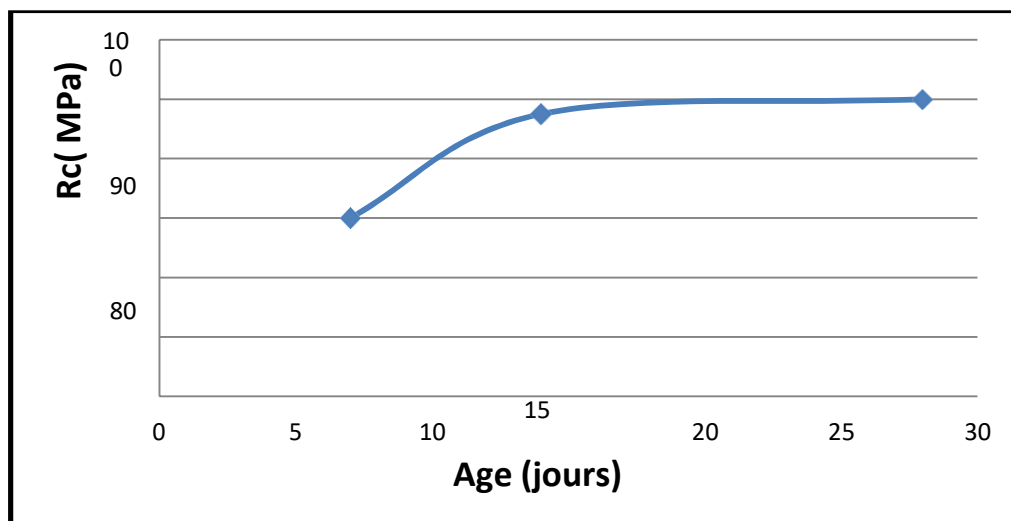
L'aspect des éprouvettes destinées à l'essai de traction par flexion est représentées par la (Figure 4.4), elle montre la robustesse du SIFCON car les éprouvettes présentent des fissures mais ne se sont pas scindées en deux comme c'est le cas pour les autres bétons soumis à ce type d'essai. L'aspect des éprouvettes écrasées (Figure 4.5) montre l'enchevêtrement des fibres ce qui renforce la matrice du béton. Il est à noter que les éprouvettes ne sont pas scindées en deux parties comme c'est le cas pour les autres bétons qui subissent un effort de

flexion.



**Figure 4.5 :** Aspect des éprouvettes destinées à l'essai de traction

De même pour les résistances à la compression (Figure 4.6) qui attribuent à ce type de béton le caractère d'un béton à hautes résistances.



**Figure 4.6 :** Evolution des résistances à la compression

La Figure 4.7 décrit l'aspect de l'éprouvette après l'essai d'écrasement et montre la densification de la matrice par les fibres.



**Figure 4.7 :** Aspect des éprouvettes destinées à l'essai de compression

### 4.6. CONCLUSION

Cette étude avait pour but d'élaborer un SIFCON contenant 5% de fibres métalliques et incorporant 1% de superplastifiant. Ce béton présente des masses volumiques supérieures à celles d'un béton ordinaire à cause du fort dosage en ciment et en fibres. Il développe des performances mécaniques remarquables lui attribuant le caractère de béton à haute résistances.

# CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

---

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

---

### CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

#### CONCLUSION GENERALE

Le béton reste un matériau moderne. En effet, il a de nombreuses qualités, parmi les quelle son peut citer son faible coût, sa facilité de moulage, son excellente résistance en compression, sa grande rigidité, sa faible conductivité thermique, sa bonne tenue au feu et sa durabilité.

Toutefois, sa faible résistance en traction et sa fragilité font que le béton doit être renforcé. Ainsi, on utilise des armatures et des câbles ou des fils de précontraintes. Ces solutions traditionnelles ont fait leurs preuves et elles resteront utilisées encore très long temps. Malgré cela, il existe une autre solution qui consiste à noyer dans le béton, des éléments résistant à la traction: des fibres qui sont naturelles sous synthétiques. Ceci conduit à obtenir un matériau composite. Les différentes recherches effectuées jusqu'à présent, et les premières applications font espérer que le béton de fibres permettra la fabrication d'éléments plus minces et résistants mieux à la fissuration.

C'est pourquoi, un nouveau type de béton a vu le jour ; il s'agit du SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete ou Béton à Infiltration de Coulis).

Ce béton 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. Ce réseau va s'opposer, et ce d'autant qu'il est plus dense, à l'élargissement de la fissure. Là où les premières fibres rencontrées effectuant une couture de la fissure jusqu'à en bloquer l'évolution.

Notre étude a été menée dans le but de découvrir ce béton innovant composé de fibres d'acier infiltrées de coulis et de contribuer à son élaboration afin d'atteindre un objectif de départ qui a été de réaliser un béton de haute résistance.

Le SIFCON est un béton qui présente de nombreuses différences par rapport aux matériaux conventionnels : béton et béton fibré, notamment en ce qui concerne sa composition. Par conséquent, il nécessite des méthodes de test et de conformité spéciales.

Par ailleurs, vu la crise sanitaire et les mesures de restrictions sanitaires, l'accès au laboratoire dans le but de réaliser notre programme expérimental a été formellement interdit. C'est pourquoi, nous avons jugé utile de décrire ce nouveau béton à travers la littérature et de synthétiser les connaissances acquises afin d'en tirer les conclusions et de recommander un travail de recherche futur basé sur l'expérimental.

#### RECOMMANDATIONS

Afin de développer ce nouveau type de béton dont une seule étude au niveau national a été mené en 2019 à l'université de Mostaganem, il est impératif de continuer la recherche dans le but d'améliorer sa composition et étudier son comportement mécanique en introduisant

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

---

d'autres paramètres caractéristiques, tel a été l'objectif de notre étude expérimentale de départ. Par conséquent nous recommandons pour des travaux futurs de cibler les points suivants :

- Valoriser les fibres locales et faire varier leur dosage (5%, 7% et 9%).
- Introduire du sable fin en adoptant un rapport ciment / sable égal à 1.
- Suivre l'évolution des résistances à la traction et à la compression
- Conclure sur le dosage en fibres optimal à l'égard du développement des performances mécaniques

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) D.R. Lankard, «Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON) », Concrete International, 1984.
- (2) D.R. Lankard, «Steel Fiber Concrete, US-Sweden Joint Seminar», June 1985.
- (3) P.M. Balaguru, and S.P. Shah, «Fiber Reinforced Concrete Composites», McGraw-Hill Inc., New York, 1992.
- (4)<https://www.hermes-technologie.com/fr/materiaux/coulis-ciment.html>
- (5)<https://www.infociments.fr/glossaire/ciment>
- (6)<http://www.guidebeton.com/eau-gachage>
- (7)[www.ensh.dz/files/Cours/1011/Matériaux%20de%20construction/Eau%20et%20adjuvants.pdf](http://www.ensh.dz/files/Cours/1011/Matériaux%20de%20construction/Eau%20et%20adjuvants.pdf)
- (8) TRINH QUANG Minh, utilisation du metakaolin par substitution partielle du ciment dans les applications géotechniques d'injection et de scellement d'ancrage, Doctorat de l'université de Toulouse, université de Toulouse 3 Paul Sabatier, Le 4 juillet 2012
- (9) <https://www.infociments.fr/betons/betons-fibres>
- (10)[https://betonabq.org/wp-content/uploads/2017/09/aDocument\\_Fibres.pdf](https://betonabq.org/wp-content/uploads/2017/09/aDocument_Fibres.pdf)
- (11) D.R. Lankard, «Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON) », Concrete International, 1984.
- (12) D.R. Lankard, «Steel Fiber Concrete, US-Sweden Joint Seminar», June 1985.
- (13) P.M. Balaguru, and S.P. Shah, «Fiber Reinforced Concrete Composites», McGraw-Hill Inc., New York, 1992.
- (14) J.R. Homrich, and A.E Naaman, «Fiber Reinforced Concrete», ACI SP-105, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1987.
- (15) H.N. Reinhardt, and C. Fritz, “Fiber Reinforced Cements and Concretes”, Recent Developments, Elsevier, 1989.
- (16) ACI Committee 544, “State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete”, Concrete International, 1982.
- (17) A.E. Naaman, “Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites”, Journal of Advanced Concrete Technology, 2003.
- (18) P.M. Balaguru, and J. Kendzulak, “Mechanical Properties of Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON),” Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1987.
- (19) A.E. Naaman, J.K. Wight, and H. Abdou, “SIFCON Connections for Seismic Resistant Frames”, Steel Reinforced Concrete, Compilation 27, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1991.
- (20) 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.
- (21) R. Mondragon, “SIFCON in Compression”, Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1987.
- (22) B. Schneider, R. Mondragon and J. Kirst, “Task Report NMERI”, New Mexico Research Institute, June 1984.

**(23)** 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.

**(24)**T. Cherguia et R.Benmerdja, «Elaboration d’un béton à infiltration de coulis (SIFCON) », Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem,2019.